



Hochschule Magdeburg-Stendal  
Fachbereich Ingenieurwissenschaften und  
Industriedesign (IWID)  
Institut für Elektrotechnik

## Bachelorarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades eines „Bachelor of Engineering“  
im Studiengang Mechatronische Systemtechnik

### ENTWICKLUNG EINES DETEKTIONSSYSTEMS FÜR DEN NAHEN INFRAROTBEREICH

eingereicht von

**Patrick Kuhne**

Matrikel: 20172190

am 17. Mai 2021

**Schulischer Betreuer:** Herr Prof. Dr.-Ing. D. Schwarzenau

**Betrieblicher Betreuer:** Herr Dr. A. Peckhaus

## **Eidesstattliche Versicherung**

Ich versichere hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Abschlussarbeit mit dem Titel

### **Entwicklung eines Detektionssystems für den nahen Infrarotbereich**

selbstständig und ohne unzulässige fremde Hilfe angefertigt habe. Ich habe keine anderen als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie inhaltlich als auch wörtlich entnommene Zitate als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit hat in dieser oder vergleichbarer Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen.

---

Ort, Datum, Unterschrift

## Abstract

Bei der Verwendung von Lasern kann es zu unbeabsichtigten Reflexionen und Streuungen an festen Oberflächen und Partikeln in der Luft kommen. Laser für Industrie- und Forschungszwecke, die oft mit Wellenlängen außerhalb des sichtbaren Lichts arbeiten, verursachen Streustrahlung, die gefährlich für das menschliche Auge und die Haut sein kann. Ziel der vorliegenden Bachelorarbeit ist es ein Detektionsgerät für den nahen Infrarotbereich zu entwickeln, in Betrieb zu nehmen und zu charakterisieren. Die Gefährdungsbeurteilung für den Menschen durch gestreute Laserstrahlung steht dabei im Vordergrund.

Es wurde ein Detektionsgerät entwickelt und gebaut, das ein definiertes und einstellbares Gesichtsfeld aufweist. Das System kann die zum Zeitpunkt der Messung vorhandenen Umwelteinflüsse erfassen und so die Umgebungsbedingungen wie Temperatur und Partikelkonzentration in der Luft ermitteln. Durch eine Positionsbestimmung mittels GPS ist es möglich, die Position der Laserquelle und des Detektionsgerätes zu bestimmen. Dadurch kann eine Gefährdungskarte angefertigt werden, die Auskunft darüber geben soll, wie hoch die Gefährdung in bestimmten Bereichen um die Laserquelle ist.

By using lasers, unintentional reflections and scattering from solid surfaces and atmospheric particles in the air may occur. Lasers used for industrial and research purposes, which often operate at wavelengths outside the visible range, can induce scattered radiation that can be dangerous to the human eye and skin. This bachelor thesis aims to develop, commission, and characterize a detection system for the near-infrared range. The risk assessment for humans by scattered laser radiation is in the focus of this thesis.

A detection device was developed and built that has a defined and adjustable field of view. The system can detect the environmental parameters present at the time of measurement and thus determine the ambient conditions such as temperature, relative humidity and particle concentration in the air. By determining the position via using global positioning system (GPS), it is possible to determine the position of the laser source and the detection system simultaneously. This allows for the construction of a hazard map that provides information about hazard levels in certain areas around the laser source.





---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>7</b>
1.1	Motivation der Arbeit . . . . .	7
1.2	Stand der Technik . . . . .	7
1.3	Stand der Wissenschaft . . . . .	8
1.4	Zielsetzung der Arbeit . . . . .	8
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>9</b>
2.1	Gesetzliche Vorgaben und technische Normen . . . . .	9
2.2	Elektromagnetische Strahlung . . . . .	11
2.3	Radiometrische Messgrößen . . . . .	12
2.4	Detektoren . . . . .	15
2.4.1	Photoelektronenvervielfacher . . . . .	15
2.4.2	Photodiodenverstärker . . . . .	17
2.5	Streulichtquellen . . . . .	17
2.5.1	Aerosolpartikel . . . . .	17
2.5.2	Streuung an Oberflächen . . . . .	19
<b>3</b>	<b>Systemkonzeption</b>	<b>20</b>
3.1	Komponenten des elektronischen Systems . . . . .	22
3.1.1	Umweltsensoren . . . . .	22
3.1.2	Detektionssystem . . . . .	24
3.1.3	Kamerasystem und Ziellaser . . . . .	26
3.2	Aufbau des optischen Systems . . . . .	27
3.3	Mechanisches System . . . . .	28
<b>4</b>	<b>Kalibration</b>	<b>31</b>
4.1	Kalibration der Ulbricht-Kugel . . . . .	31
4.2	Kalibration des Einplatinenrechners . . . . .	32
4.3	Kalibration der Detektionssysteme . . . . .	33
4.3.1	Bestehendes System mit PMT . . . . .	34
4.3.2	Neues System mit PMT . . . . .	35
4.3.3	Neues System mit PDA . . . . .	36
<b>5</b>	<b>Durchführung</b>	<b>37</b>
5.1	Testmessung . . . . .	38
5.2	Streulichtmessung in der Bearbeitungsbox . . . . .	39
5.3	Hintergrundmessung auf der Freistrahlstrecke . . . . .	41
<b>6</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>42</b>
6.1	Testmessung . . . . .	42

6.2	Streulichtmessungen in der Bearbeitungsbox . . . . .	44
6.2.1	Winkelabhängigkeit bei Optopolymer . . . . .	44
6.2.2	Winkelabhängigkeit bei Aluminium . . . . .	49
6.2.3	Abstandsabhängigkeit . . . . .	52
6.3	Hintergrundmessungen auf der Freistrahlstrecke . . . . .	53
6.3.1	Umweltsensorik . . . . .	53
6.3.2	Detektionssystem . . . . .	60
<b>7</b>	<b>Fazit und Ausblick</b>	<b>63</b>
7.1	Zusammenfassende Bewertung . . . . .	63
7.2	Ausblick . . . . .	64
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>65</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>68</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>70</b>
	<b>Anhang</b>	<b>71</b>

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation der Arbeit

Lasertechnik ist vielfach in unserem Alltag zu finden. Sei es im Lesekopf eines optischen Laufwerks für eine Spielekonsole, einem Laserentfernungsmessgerät oder Lichtschranken von Alarmanlagen. Oftmals ist die Wellenlänge des Lasers außerhalb des sichtbaren Bereiches, wodurch eine unsichtbare Gefahr entsteht. Daher ist es wichtig ein Detektionsgerät zu haben, das die vorhandene Leistung eines Laserstrahls bestimmt.

Doch nicht nur die Strahlung, die direkt vom Laser auf ein Ziel trifft, ist gefährlich. Der Laserstrahl trifft auf seinem Weg auch auf kleinste Teilchen, wie Staub oder auch Wassertropfen, sogenannte Aerosole. Wenn das passiert, wird der Strahl des Lasers gestreut und auch die daraus resultierende Streustrahlung kann, bei Verwendung von Hochenergielasern noch gefährlich für den Menschen, insbesondere das menschliche Auge sein. Es wird ein Detektionssystem gebraucht, das durch seinen Aufbau die geometrischen Eigenschaften des Auges nachbildet. Die einfallende Streustrahlung kann dann detektiert und die Gefährdung nach den technischen Regeln für optische Strahlung (TROS) bestimmt werden.

Am Institut für Technische Physik (DLR Standort Lampoldshausen) existiert bereits ein vorhandenes Detektionssystem zur Erfassung von Streustrahlung. Es wurde ein Photoelektronenvervielfacher (PMT) als Detektor verwendet und besitzt bereits begrenzte Möglichkeiten, verschiedene optische Komponenten wie Filter aufzunehmen. Ein Tubus, der sich vor dem Detektor befindet, hat bereits geometrische Eigenschaften, die sich an denen des menschlichen Auges orientieren. Erreicht wird dies durch eine definierte Tubuslänge und zwei Aperturen.

Dieses System hat den Nachteil, dass das Gesichtsfeld des Detektors nicht scharf definiert ist. Dadurch ergibt sich eine größere Unsicherheit im Streuvolumen. Die Sammeleffizienz der gestreuten Strahlung ist an die Fläche der Eintrittsapertur gebunden ist. Weiterhin kann nur ein PMT als Detektor genutzt werden und es werden keine Umwelteinflüsse und Positionsdaten erfasst.

## 1.2 Stand der Technik

Viele Hersteller bieten Systeme an, mit denen man die Leistung eines Lasers bestimmen kann. Doch keines dieser Systeme ist dafür gedacht, die Streuleistung durch Streuquellen zu ermitteln und ihre Gefährdung für den Menschen, insbesondere das Auge, zu bestimmen. Vielmehr sind es Detektoren, um die Laserleistung innerhalb des Strahles direkt zu bestimmen. Dabei wird der Detektor direkt oder indirekt in dem Laserstrahl platziert. Die Systeme sind dabei so aufgebaut, dass es einen Detektorkopf gibt und ein Handgerät mit Display. Jeder Detektorkopf hat genaue Spezifikationen, für welche Wellenlänge, Leistung und ob er gepulste oder kontinuierliche Laserstrahlen messen kann. Unterschieden werden die Energiemessung und die Leistungsmessung. Die Detektoren basieren dabei auf verschiedenen Messprinzipien wie z.B. den photoelektrischen Effekt oder den

pyroelektrischen Effekt. Beim pyroelektrischen Effekt werden Temperaturänderungen detektiert, was sie unabhängiger von der Wellenlänge macht.

Eine weitere Art von Messgeräten sind Spektroradiometer. Mit ihnen können bestimmte Wellenlängenbereiche abgedeckt und die Strahldichte erfasst werden. Genau definiert wird der Wellenlängenbereich durch die Empfindlichkeit des Detektors. Laborspektrometer decken häufig einen Bereich von Ultraviolett bis Infrarot ab. Dadurch sind sie vielfältig einsetzbar und werden oft für Kalibrationen benutzt. Weitere Einsatzzwecke sind z. B. die Ferndetektion in der Landwirtschaft (Pflanzenforschung, Schädlinge), die medizinische Forschung und Anwendung oder die Geowissenschaften.

Hersteller von Detektoren und Spektroradiometern sind zum Beispiel Ophir, Thorlabs, SpereOptics und Gigahertz-Optik ([Oph], [Tho], [Sph]).

## 1.3 Stand der Wissenschaft

Der Stand der Wissenschaft beschreibt die jeweils aktuellsten Erkenntnisse aus der Wissenschaft. Durch neue wissenschaftliche Erkenntnisse entwickelt er sich ständig weiter. Dadurch ist der Stand der Wissenschaft dem Stand der Technik oft voraus, da es einige Zeit dauert neue wissenschaftliche Erkenntnisse in der Technik umzusetzen.

Das Thema betreffend sind die wissenschaftlichen Arbeiten von D. A. Corder und M. Mishchenko zu erwähnen. In den wissenschaftlichen Artikeln von Corder von 1997 sind bereits Detektionssysteme mit verschiedenen Messköpfen beschrieben, mit denen Streustrahlung durch Reflexionen charakterisiert und gemessen werden kann. [CET97] [Cor+97] Der Aufbau des neuen Detektionssystems basiert auf den wissenschaftlichen Artikeln von Mishchenko [Mis13] [Mis15]. Dort wird beschrieben, wie Detektionssysteme (kollimierte Radiometer) aufgebaut sein können, um mit ihnen aus einem bestimmten Raumwinkel die Streustrahlung von Objekten zu detektieren.

## 1.4 Zielsetzung der Arbeit

Im Rahmen dieser Abschlussarbeit soll ein kompaktes und mobiles Detektionssystem entwickelt werden, um die Streustrahlungen von Hochleistungslaser-Effektoren zu detektieren. Auf Basis eines vorhandenen Systems, soll die Empfangsoptik verbessert und der Einsatz verschiedener Detektoren ermöglicht werden, sodass die Streustrahlung von festen Oberflächen und Streupartikeln erfasst werden kann. Weiterhin sind experimentelle Untersuchungen auf der Laserfreistrahlstrecke in Lampoldshausen geplant. Auf der Freistrahlstrecke können mit einem 6000 W Scheibenlaser von Trumpf Bestrahlungsexperimente und Untersuchungen zur atmosphärischen Propagation durchgeführt werden.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Gesetzliche Vorgaben und technische Normen

Regelungen zur Lasersicherheit existieren auf verschiedenen Ebenen (d. h. nationale, europäische und internationale Regelwerke). Internationale Richtlinien werden von der internationalen Kommission für den Schutz vor nicht ionisierender Strahlung (kurz ICNIRP), einer Vereinigung von Wissenschaftlern zur Erforschung der Auswirkung nicht ionisierender Strahlung auf die menschliche Gesundheit, herausgegeben. Dabei handelt es sich um Grenzwertempfehlungen, die auf aktuellen Forschungsergebnissen beruhen. Europäische Richtlinien wurden vom Europäischen Parlament und Rat mit der Richtlinie 2006/25/EG festgelegt, dort sind die Mindestvorschriften zum Schutz der Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer vor der Gefährdung durch künstliche optische Strahlung angegeben (Abbildung 2.1). In Deutschland (d. h. auf nationaler Ebene) ist die Optische Strahlenschutzverordnung und die Technischen Regeln zur Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung (TROS) gültig. Sowohl die europäischen Richtlinien als auch die nationalen Verordnungen orientieren sich an den Empfehlungen der ICNIRP.

### Übersicht der Regelwerke zur Lasersicherheit

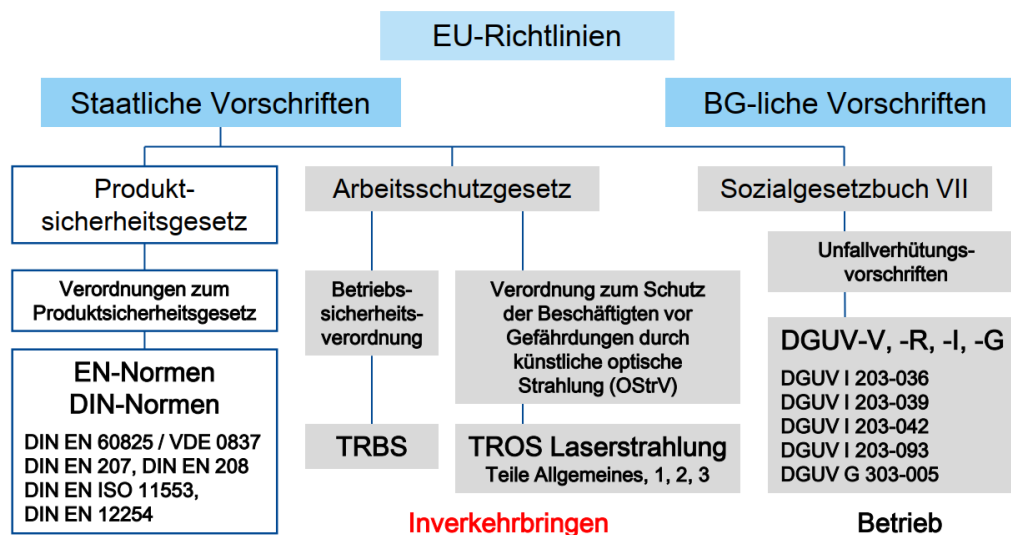


Abbildung 2.1: Regelwerk zur Lasersicherheit Quelle: [ETE20]

Mit den TROS wird die Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung (OStrV) hinsichtlich der Ermittlung und Bewertung der Gefährdungen durch inkohärente optische Strahlung und/oder Laserstrahlung, der Messungen und Berechnungen von Expositionen gegenüber inkohärenter optischer Strahlung und/oder Laserstrahlung sowie der Ableitung von geeigneten Schutzmaßnahmen konkretisiert. Sie geben den Stand der Technik, der Arbeitsmedizin und der Arbeitshygiene, sowie sonstige gesicherte arbeitswissenschaftliche Erkenntnisse zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch Laserstrahlung wieder. Der Anwendungsbereich der TROS, Teil 2 „Messungen und Berechnungen von Expositionen gegenüber Laserstrahlung“ beschreibt das Vorgehen bei der Planung, der Beauftragung, der Durchführung und Auswertung von Messungen und Berechnungen zur Exposition am Arbeitsplatz nach dem Stand der Technik und den Vergleich der Messergebnisse mit den Expositionsgrenzwerten. Die Dokumentation der Expositionsmessungen von Laserstrahlung ist Teil der Gefährdungsbeurteilung. Die Technischen Regeln zur Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung verweisen dabei auf die Deutschen Industrie-Normen (DIN) [Aus]. Das vorhandene Detektionssystem orientiert sich an den TROS Teil 2.

Im Gegensatz zu gesetzlichen Vorgaben, sind technische Normen Standards, auf die sich die Beteiligten in der Industrie einigen. Im Fall der Lasersicherheit ist die DIN EN 60825-1 für die Hersteller von Lasereinrichtungen anzuwenden. In der Norm ist die Unterscheidung von 8 Laserklassen beschrieben und welche Messverfahren für die Klassifizierung einzusetzen sind. Laser können aufgrund der Eigenschaften ihrer Strahlung und aufgrund ihrer z. T. extrem konzentrierten elektromagnetischen Strahlung biologische Schäden verursachen. Daher sind Laser je nach Laserklasse mit genormten Warnhinweisen zu versehen. Dabei werden Bereiche der Wellenlängen und Einwirkzeiten unterschieden, die zu charakteristischen Verletzungen und Verletzungsschwellwerten der Leistungs- oder Energiedichte führen, woraus Expositionsgrenzwerte abgeleitet werden [Nor15].

Anwender und Anlagenbauer müssen direkte (unbeabsichtigt gerichtet reflektierte) und indirekte (unbeabsichtigt diffus reflektierte) Streustrahlung hinsichtlich dieser Grenzwerte berücksichtigen. Für die Einhaltung der Grenzwerte müssen technische Geräte zur Verfügung stehen oder gebaut werden und die dazugehörigen Messverfahren entwickelt und dokumentiert werden.

## 2.2 Elektromagnetische Strahlung

Als Strahlung, genauer elektromagnetische Strahlung, werden Felder aus elektrischen und magnetischen Wellen bezeichnet. Elektromagnetische Wellen werden nach Wellenlänge und Frequenz in verschiedene Bereiche eingeteilt. Die Abbildung 2.2 zeigt das elektromagnetische Spektrum mit den häufig verwendeten Bezeichnungen der Wellenlängen- und Frequenzbereiche. Das menschliche Auge kann nur elektromagnetische Strahlung im Wellenlängenbereich von 400–780 nm (sichtbares Licht) wahrnehmen. Als Violett sehen wir das kurzwellige Ende dieses Bereichs, als rot das langwellige. Außerhalb des violetten sichtbaren Lichts bis zu Wellenlängen von 10 nm ist die kurzwellige Ultraviolett- oder UV-Strahlung, außerhalb des roten sichtbaren Lichts bis zu Wellenlängen von 100  $\mu\text{m}$  die langwellige Infrarot- oder IR-Strahlung. Wärmestrahlung von Körpern liegt im Infrarotbereich. Die Bereiche sind nicht klar voneinander abgegrenzt. Röntgenstrahlen sind elektromagnetische Wellen mit Wellenlängen um 0,1 nm. Als Gammastrahlen werden sie bezeichnet wenn sie durch Kernzerfall oder durch Paarvernichtung (Materie-Antimaterie) entstehen. Die Wellenlänge unterliegt theoretisch keinerlei Beschränkungen [TMW14].

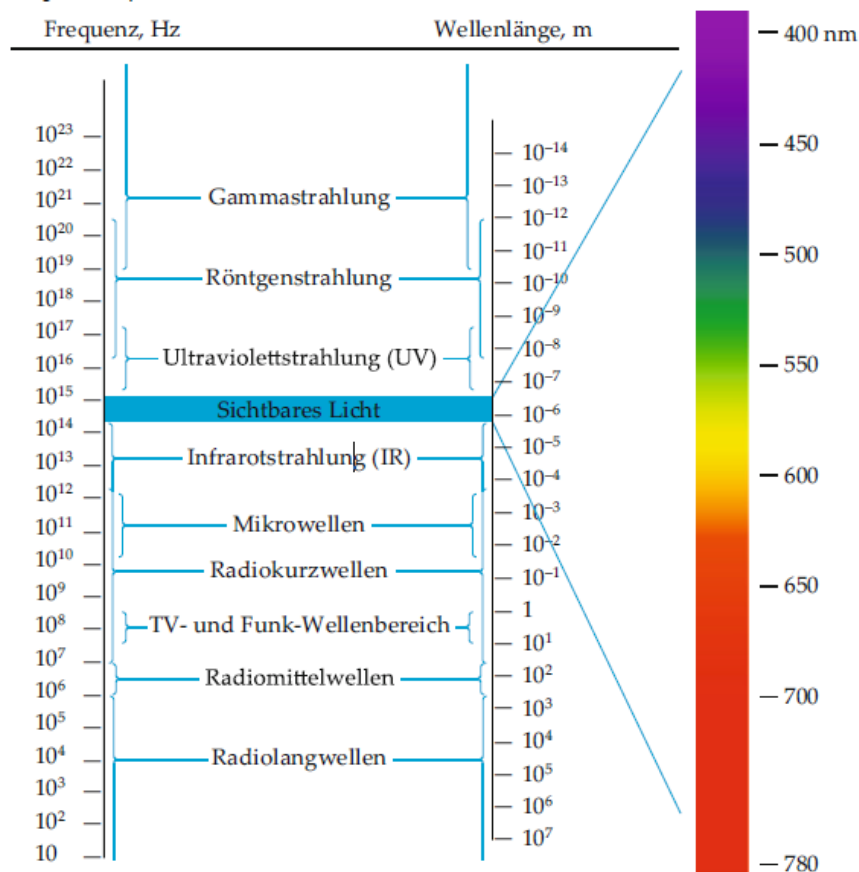


Abbildung 2.2: Das elektromagnetische Spektrum Quelle: [TMW14]

## 2.3 Radiometrische Messgrößen

Die Beschreibung der radiometrischen Größen ist modifiziert nach Quelle [DP05].

Lichtmesstechnik wird in zwei Teilbereiche unterteilt, Photometrie und Radiometrie. Photometrie beschäftigt sich mit der Farbwahrnehmung, also mit Messungen von sichtbarem Licht. Radiometrie wird zur Bestimmung des ganzen elektromagnetischen Spektrums angewendet, gemessen wird in Energie pro Zeiteinheit (Leistung in Watt). Radiometrische Größen werden mit dem Subskript „e“ für Energie versehen oder mit dem Subskript „λ“ wenn sie als Funktion der Wellenlänge angegeben sind.

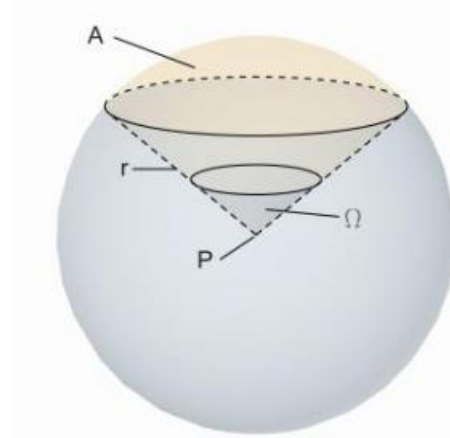


Abbildung 2.3: Raumwinkel eines Beobachters vom Punkt P Quelle: [Gig]

Der Raumwinkel  $\Omega$  ist eine dreidimensionale geometrische Größe, während das Sichtfeld eine zweidimensionale Größe ist. Beide lassen sich ineinander umrechnen. Die Fläche  $A$  auf der Kugeloberfläche ist ein Teil des gesamten Sichtfeldes (Abbildung 2.3). Der Raumwinkel  $\Omega$  kann definiert werden als:

$$\Omega = \frac{A}{r^2} \quad (2.1)$$

Das gesamte Sichtfeld eines Beobachters wird durch die Kugeloberfläche ( $4\pi r^2$ ) beschrieben. Der Raumwinkel beträgt dann:

$$\Omega_{total} = \frac{4\pi r^2}{r^2} = 4\pi = 12.57 \text{ sr} \quad (2.2)$$

Die Fläche  $A$  ist proportional zu  $r^2$ , dadurch ist der totale Raumwinkel unabhängig vom Kugelradius. Obwohl der Raumwinkel dimensionslos ist, wird üblicherweise die Einheit Steradian [sr] verwendet, das Sichtfeld wird in Bogenmaß (häufiger [mrad]) angegeben. Ein Raumwinkel von 1 sr ist definiert als der Raumwinkel, der von  $1 \text{ m}^2$  in einem Abstand von 1 m von einer Fläche begrenzt wird.



Der Strahlungsfluss  $\varphi_e$  definiert alle anderen radiometrischen Größen und charakterisiert die abgegebene Gesamtleistung ( $P$  in Watt) einer Lichtquelle. Er beinhaltet keine Information über die spektrale Verteilung oder die Richtungsverteilung der abgegebenen Strahlung. Wenn eine Lichtquelle ihr Licht gleichmäßig in alle Richtungen abgibt, wird sie als isotrope Lichtquelle bezeichnet (Abbildung 2.4).

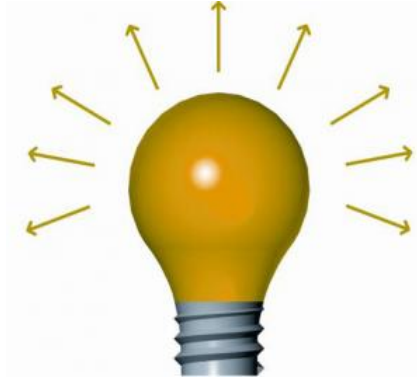


Abbildung 2.4: Strahlungsfluss einer Lichtquelle Quelle: [Gig]

Die Strahlstärke  $I_e$  gibt den Anteil von  $d\varphi_e$  an, der von einer Quelle in den Raumwinkel  $d\Omega$  abgegeben wird (Abbildung 2.5). Sie ist gegeben durch:

$$I_e = \frac{d\varphi_e}{d\Omega} \quad (2.3)$$

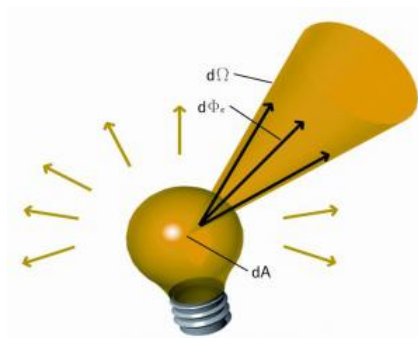


Abbildung 2.5: Typische Richtungsverteilung einer Lichtquelle Quelle: [Gig]

Die Strahlstärke ist eine richtungsabhängige Größe. Ihre Einheit lautet  $[\frac{W}{sr}]$ .

Die Strahldichte  $L_e$  beschreibt wie viel Strahlungsleistung von einer Fläche im Raumwinkel ausgeht, mit der emittiert oder reflektiert wird. Die Einheit ist  $[\frac{W}{m^2 \cdot sr}]$ .

$$L_e = \frac{dI_e}{dA} = \frac{d\varphi_e}{\cos(\vartheta) \cdot dA \cdot d\Omega} \quad (2.4)$$

$\vartheta$  gibt den Winkel zwischen Raumwinkel  $d\Omega$  und Oberfläche  $dA$  an. Daraus folgt, dass die Strahldichte  $dL_e$ , die von einer Oberfläche  $dA$  in eine bestimmte Richtung abgegeben wird, gegeben ist durch:

$$I_e = dL_e \cdot \cos(\vartheta) \cdot dA \quad (2.5)$$

Die Einheit der Strahldichte ist  $[\frac{W}{m^2 \cdot sr}]$ .

Die Bestrahlungsstärke  $E_e$  beschreibt die Strahlungsleistung die auf eine Oberfläche auftrifft.

$$E_e = \frac{d\varphi_e}{dA} \quad (2.6)$$

Die Oberfläche kann unter einem beliebigen Winkel zur Strahlrichtung orientiert sein (Abbildung 2.6). Die maximale Bestrahlungsstärke ist erreicht, wenn der Strahl parallel zur Oberflächennormale einfällt.

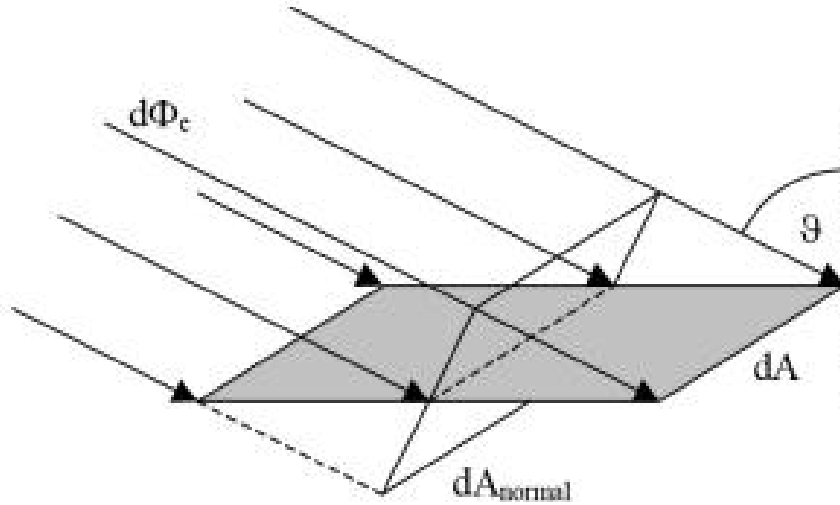


Abbildung 2.6: Bestrahlungsstärke: Strahlenfluss pro Oberfläche Quelle: [Gig]

Die Einheit der Bestrahlungsstärke lautet  $[\frac{W}{m^2}]$ .

Die bidirektionale Reflektionsverteilungsfunktion (engl. BRDF) beschreibt die Reflektionseigenschaften einer Materialoberfläche. Während einer Messung wird eine Materialprobe von einer Lichtquelle mit einer bestimmten Wellenlänge  $\lambda$  bestrahlt und die davon reflektierte Strahldichte  $L_s$  gemessen (Abbildung 2.7). Das Verhältnis der reflektierten Strahldichte zur Bestrahlungsstärke  $E_i$ , die aus der Beleuchtungsrichtung auf die Oberfläche wirkt, ergibt die BRDF [Sto12].

$$BRDF = \frac{dL_s}{dE_i} = \frac{d\varphi_s}{d\varphi_i \cdot \cos(\vartheta) \cdot \Omega_s} \quad (2.7)$$

$\varphi_s$  ist definiert als die Streuleistung von einer Oberfläche und  $\varphi_i$  als die einfallende Leistung auf eine Oberfläche.

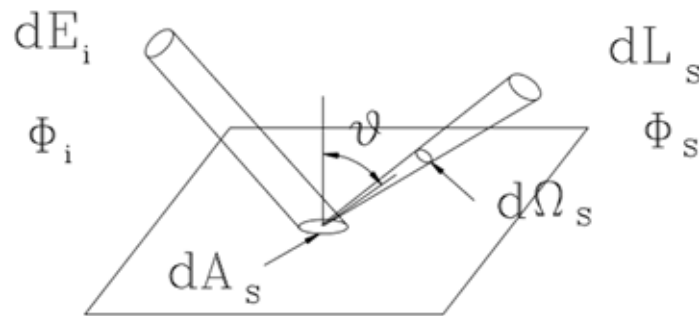


Abbildung 2.7: Bestimmung der BRDF Quelle: [Jac]

## 2.4 Detektoren

Zur Messung elektromagnetischer Strahlung werden Detektoren für die Leistungs- und Energiemessung verwendet, die oft auch als Teilchendetektor dienen können. Dabei werden unterschiedliche Effekte genutzt, wie der photoelektrische oder pyroelektrische Effekt. Im verwendeten Aufbau werden zwei Systeme genutzt. Ein Photoelektronenvervielfacher (engl. PMT) und ein Photodiodenverstärker (engl. PDA). Beide Systeme nutzen den photoelektrischen Effekt. Weitere Beispiele für Detektoren sind Photozellen zum Nachweis von Licht (NIR und UV), CCD-Sensoren (ladungsgekoppeltes Bauteil) zum orts aufgelösten Nachweis von sichtbarem Licht oder Halbleiterdetektoren aus Silizium oder Germanium zum Nachweis von Infrarotstrahlung [Tho].

### 2.4.1 Photoelektronenvervielfacher

Photomultiplier Tube (PMT) oder Photoelektronenvervielfacher bezeichnet eine spezielle Elektronenröhre, die schwache Lichtsignale durch Erzeugung und Verstärkung eines elektrischen Signals detektieren kann. Er besteht aus einer Photokathode und einem nachgeschalteten Sekundärelektronenvervielfacher in einer Vakuumröhre.

Wie bei einer Photozelle treffen die Photonen auf die Photokathode und lösen durch den äußeren photoelektrischen Effekt Elektronen aus deren Oberfläche. In einem elektrischen Feld werden die freigesetzten Elektronen beschleunigt und treffen auf weitere Elektroden (Dynoden). Aus deren

Oberfläche schlägt jedes auftreffende Elektron mehrere Sekundärelektronen heraus (Abbildung 2.8). Die Anzahl der Elektronen nimmt von Dynode zu Dynode exponentiell zu. Zum Schluss treffen alle Elektronen auf die Anode. Durch einen Spannungsabfall über einem Widerstand wird das Ausgangssignal erzeugt.

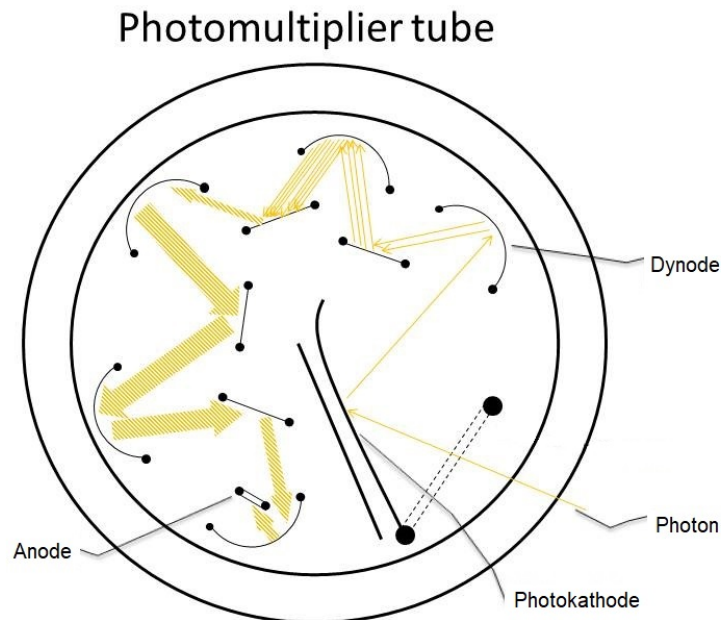


Abbildung 2.8: Funktionsweise on-side PMT Quelle: [Uni]

Die Anzahl der Dynoden bestimmt den Verstärkungsfaktor. Typische Multiplier haben 10 Dynoden. Die Anzahl der Sekundärelektronen ist begrenzt durch eine Sättigungsschwelle, die bei etwa 10 % des Querstromes liegt. Die Höhe der Ausgangsspannung ist proportional zur eingestrahnten Photonenanzahl, also zur Intensität des Lichts.

Wegen ihrer hohen Empfindlichkeit müssen sie bei Betrieb vor einer zu starken Beleuchtung geschützt werden. Wird ein zu hoher Strom erzeugt, wird die Beschichtung der Dynoden (z. B. Alkali Antimonide, BeO, MgO und besonders empfindliche Halbleiterschichten wie GaP oder GaAsP) irreversibel beschädigt und kann zu einem „Erblinden“ oder Durchbrennen des Photomultipliers führen[Ham07].

Photomultiplier sind an ein Hochspannungsnetzteil angeschlossen an dem die Versorgungsspannung bereitgestellt wird. Da Potomultiplier einen genau definierten Temperaturbereich brauchen um verlässlich zu arbeiten, sind sie in einem Cooler Gehäuse montiert. Darin befinden sich ein Peltier-Element und ein Kühlkörper mit Lüfter. Beides wird von einem Cooler Controller geregelt.

### 2.4.2 Photodiodenverstärker

Photodioden sind Halbleiterbauelemente, die elektromagnetische Strahlung emittieren und detektieren können. Durch den inneren Photoeffekt werden einfallende Photonen in einen elektrischen Strom (Photostrom) umgewandelt oder bieten diesem einen beleuchtungsabhängigen Widerstand.

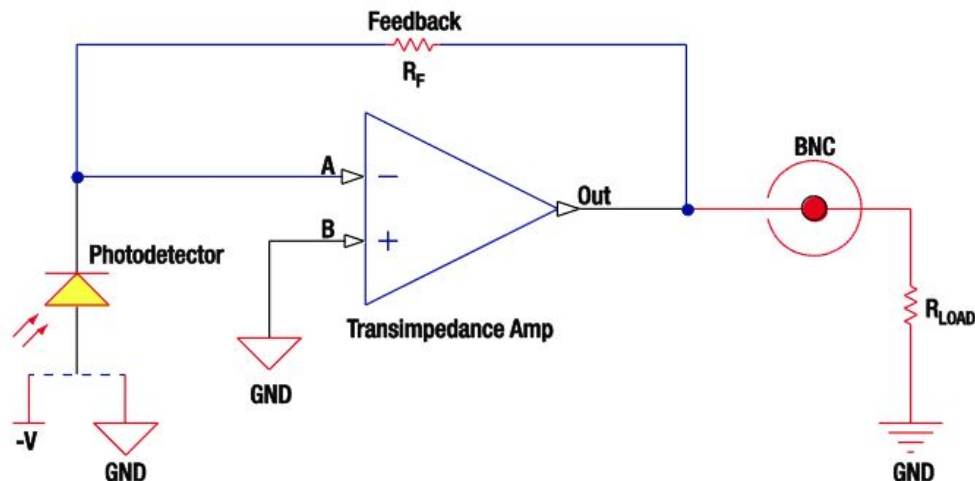


Abbildung 2.9: Schaltbild PDA 100A2 von Thorlabs Quelle: [Tho17]

Ein Photodiodenverstärker (Photodiode Amplifier, kurz PDA) verstärkt den Photostrom einer Photodiode. Er ist ein Transimpedanzverstärker (TIA,) der nach einer Photodiode geschaltet ist. Für Messzwecke und hohe Linearitäts- und Empfindlichkeits-Anforderungen werden aus Operationsverstärkern gebildete Transimpedanzverstärker eingesetzt, die eine zum Photostrom proportionale elektrische Spannung abgeben. Über die Rückkopplung  $R_F$  kann die Verstärkung des PDA eingestellt werden (Abbildung 2.9) [Tho17].

## 2.5 Streulichtquellen

### 2.5.1 Aerosolpartikel

Aerosole sind kleine feste oder flüssige Partikel, die in der Gasphase dispergiert sind. Durch Kondensation von Dämpfen an bereits vorhandenen Partikeln, Verdampfen flüssiger Bestandteile der Partikel, Koagulation kleiner Teilchen zu großen oder Abscheidung von Teilchen an umgebenden Gegenständen unterliegen sie ständiger Änderung. Aerosole werden nach ihrer Entstehung, Größe, Materialeigenschaft und Wirkung eingeteilt. Atmosphärische Aerosole haben z. B. Auswirkungen auf das Klima.

Die Streuung an den Molekülen in der Luft wird als Rayleigh-Streuung bezeichnet. Sie ist verantwortlich für das Himmelsblau und den roten Sonnenuntergang. Sie ist stark polarisiert (nur eine Polarisationsrichtung) bei einem Streuwinkel von  $90^\circ$  zur Einfallsrichtung. Die Streuung an fallenden Regentropfen und makroskopischen Partikeln wird als klassische (geometrische) Streuung bezeichnet. Die Mie-Streuung tritt bei Aerosolpartikeln auf, die kleiner bzw. gleich der Wellenlänge des Lichts sind. Sie weist eine schwache Wellenlängenabhängigkeit auf. Die Winkelverteilung

der Streustrahlung eines Aerosolpartikels ist stark strukturiert mit einer starken Streuung in der Vorwärtsrichtung (Abbildung 2.10) [Sch+07].

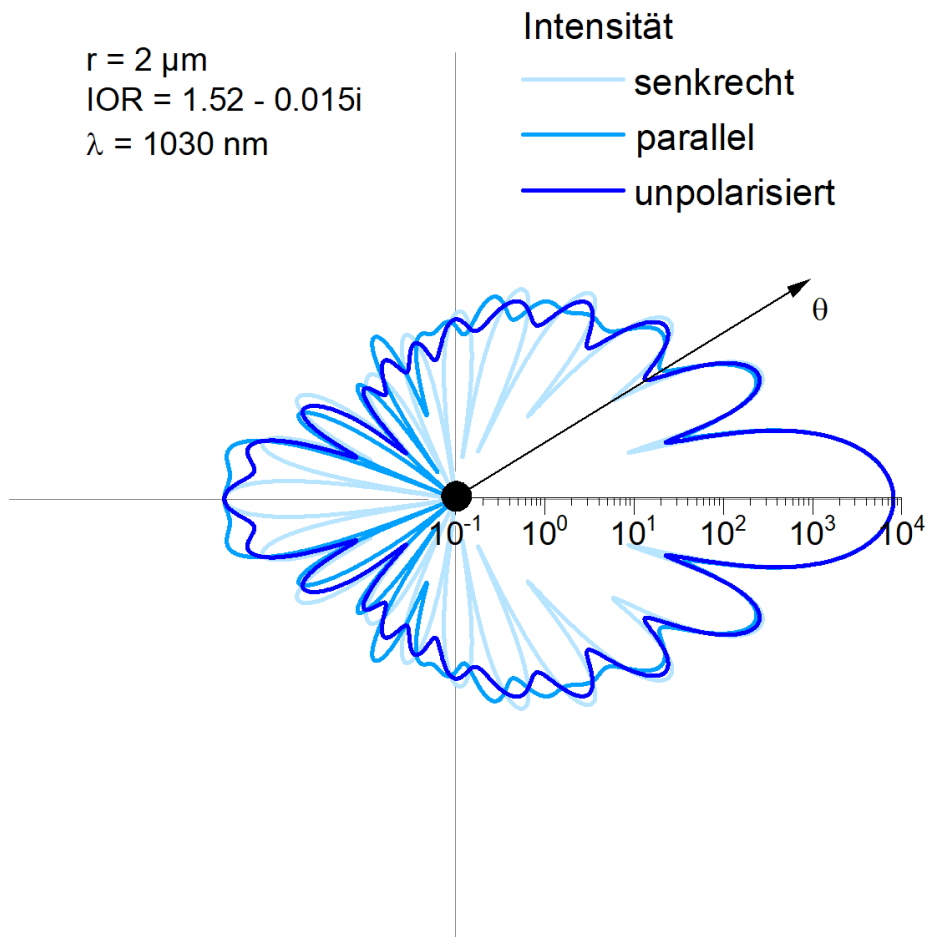


Abbildung 2.10: Beispielhafte Darstellung der Streuung an einem atmosphärischen Partikel  
Quelle: [mie]

### 2.5.2 Streuung an Oberflächen

Trifft elektromagnetische Strahlung auf eine Oberfläche, treten verschiedene Prozesse wie z. B. Reflexion, Streuung, Transmission und Absorption auf. Abhängig von der Materialzusammensetzung und der Oberflächenbeschaffenheit dominiert ein bestimmter Prozess. Bei der Reflexion an einer festen Oberfläche kann es zu einer spekularen (gerichteten) oder diffusen (nicht gerichteten) Reflexion kommen, auch eine Mischform aus beiden ist möglich (Abbildung 2.11).

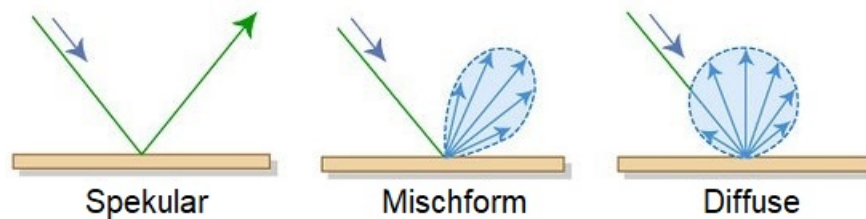


Abbildung 2.11: Arten der Reflexion von Oberflächen Quelle: [MIT]

Beispiel für eine spekulare Reflexion ist eine Oberfläche die sehr glatt ist, wie bei einem Spiegel. Bei dieser Art der Reflexion ist der Einfallswinkel gleich dem Ausfallswinkel. Bei einer diffusen Reflexion ist die Oberfläche rau, dadurch werden die einfallenden Strahlen in undefinierte Winkel abgestrahlt [Van].

Ein Lambertscher Strahler ist ein Strahler, dessen Strahldichte in alle Richtungen gleich ist (vollkommen diffuser Strahler). Er wirkt damit aus allen Betrachtungsrichtungen als immer gleich hell. Es gibt kein Material, dass das Lambertsche Gesetz erfüllt. Das Lambert-Modell wird benutzt um die diffuse Reflexion von Oberflächen zu charakterisieren. Ein Material das dem Lambertschen Strahler sehr nahe kommt ist Spectralon (Albedo von  $>0,99$ ), es wird oft in Ulbrichtkugeln verwendet. Auch gepresstes oder gespachteltes Bariumsulfat (Albedo  $\approx 0,98$ ) kommt dem sehr nah [Spe].

Für Bestrahlungsexperimente bei denen das Reflexionsverhalten untersucht werden soll, werden speziell angefertigte Platten, sogenannte Reflexionstargets, verwendet.

## 3 Systemkonzeption

Das System soll kompakt und mobil sein, sowie die Verwendung verschiedener Detektoren ermöglichen. Daher befinden sich alle Komponenten in einer fahrbaren Rollbox und der Detektor in einem Wetterschutzgehäuse auf einem höhenverstellbaren Stativ mit Kardankopf (Abbildung 3.1). So ist es überall flexibel einsetzbar und leicht zu transportieren. Zum Betreiben ist im derzeitigen Entwicklungsstadium eine Stromversorgung und eine Netzwerkanbindung erforderlich.

Zusätzlich zu der Erfassung von Streustrahlung sollen verschiedene Umweltbedingungen erfasst werden, die für eine genaue Betrachtung der Strahlungsleistung erforderlich sind. Dazu zählen Wetterdaten wie Temperatur, Feuchtigkeit und Partikelanzahl in der Luft. Partikel in der Luft beeinflussen die Streuung von Laserstrahlen und durch die Temperatur und Luftfeuchtigkeit wird die Größe und der Phasenzustand der Partikel beeinflusst, daher ist es notwendig diese zu messen, um die Strahlungsleistung zu bewerten. Das System soll in einem späteren Entwicklungsstadium eine Gefährdungskarte anzeigen, dazu wird eine Standortsbestimmung der Laserquelle und des Detektionssystem benötigt. Realisiert wird das über zwei GPS-Module, wobei sich eines am Detektionssystem und eines an der Laserquelle befinden sollen. Auf der Gefährdungskarte soll dann dargestellt sein, wo Grenzwerte überschritten werden.



Abbildung 3.1: Aufbau auf der Freistrahlstrecke



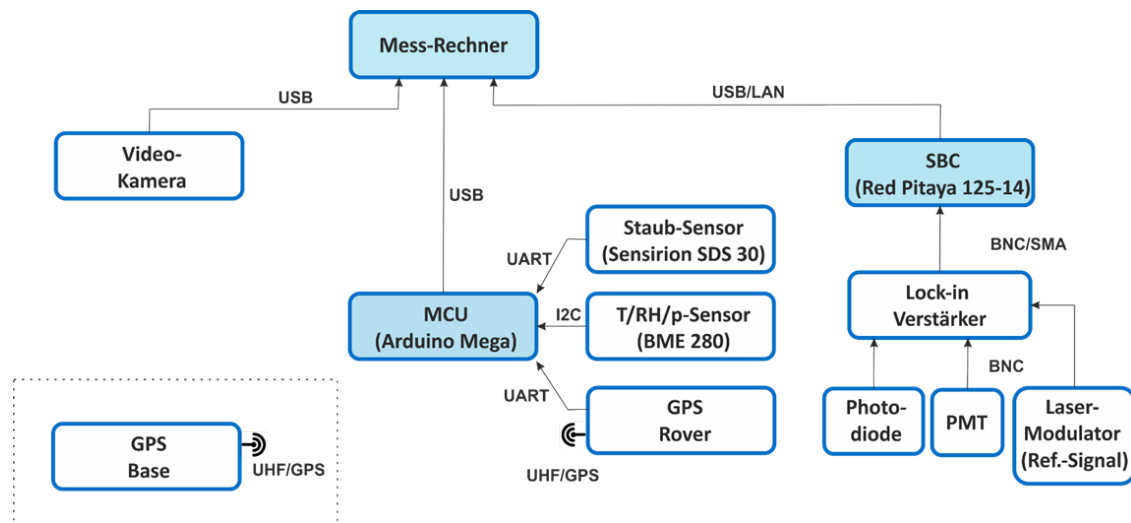


Abbildung 3.2: Elektronik Schaltung Quelle [Pec+21]

In Abbildung 3.2 sind die Komponenten des Systems und ihre Schnittstellen dargestellt. Ein Messrechner bildet die Hauptrecheneinheit des Systems. Es handelt sich um einen Fujitsu ESPRIMO G558, einen kleinen Desktop-PC mit einem Windows-Betriebssystem. Angesprochen wird er über eine Remote-Netzwerkverbindung. Auf ihm werden die Daten der Sensorik, des Detektionssystems und der PI-Kamera verarbeitet und gespeichert. Die Programmierung erfolgte in der Sprache Python. Für jedes der Subsysteme wurde dabei ein Unterprogramm erstellt, das in einem Hauptprogramm aufgerufen wird. Die Subsysteme umfassen einen Arduino, der die Datenerfassung des Wetter-, Partikel- und GPS-Sensors übernimmt und einen Red Pitaya, der als Digital Oszilloskop arbeitet und den Detektor auswertet. Ein Raspberry PI Zero der zum Auslesen der Kamera konfiguriert wurde, bildet das dritte Subsystem. Die einzelnen Komponenten werden im folgenden genauer beschrieben.

## 3.1 Komponenten des elektronischen Systems

### 3.1.1 Umweltsensoren

Ein Arduino Mega 2560 wird zur Auswertung der Sensorik verwendet. Es ist ein 8-bit Mikrocontroller-Board, das auf einem Atmega2560 basiert, mit 54 digital Pins, 16 analog Eingängen und 4 seriellen Ports (Abbildung 3.3). Die große Anzahl an Ein- und Ausgängen helfen, das System variabel an die Einsatzbedingungen anzupassen und ermöglichen auch spätere Erweiterungen. Die GPS-Module und der Sensor sind über serielle Verbindungen (TX-RX) angeschlossen und der BME280 über I2C (SDA-SCL). Die Spannungsversorgung und Kommunikation erfolgt direkt vom Messrechner über die USB-Schnittstelle [Ard].

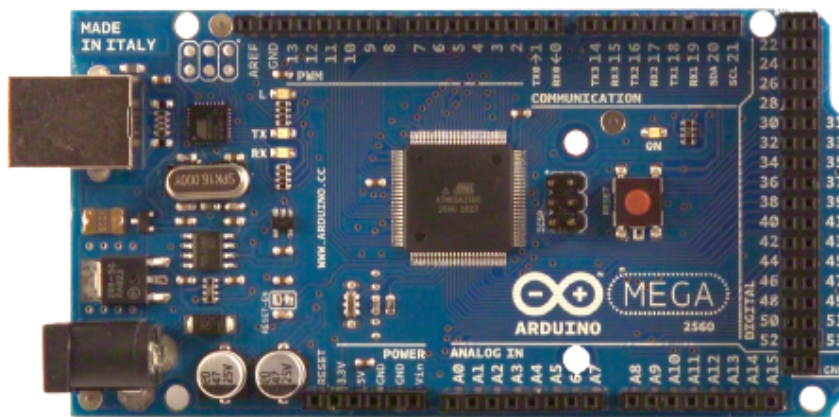


Abbildung 3.3: Arduino Mega 2560 Quelle: [Ard]

Die Erfassung von Wetterdaten übernimmt ein BME280 Sensor von der Firma Bosch (Abbildung 3.4). Er arbeitet als Feuchtigkeits-, Druck- und Temperatursensor. Durch seine kleine Baugröße und seinen geringen Energieverbrauch eignet er sich perfekt zur mobilen Verwendung [Bos]. Die Ansteuerung erfolgt mit dem Arduino.

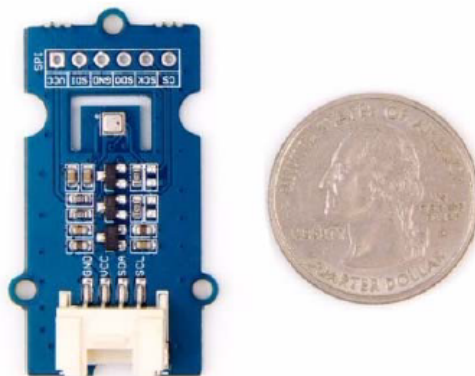


Abbildung 3.4: Grove - Barometer Sensor Quelle: [Bos]

Zur Bestimmung der Position des Detektionssystems wurden zwei ublox GPS-Module (Abbildung 3.5) verwendet. Durch die Verwendung von zwei Modulen, ist es möglich einen RTK (Real Time Kinematic) Modus zu benutzen, der eine Genauigkeit von  $\pm 2\text{ cm}$  besitzt. Ein Modul befindet sich dabei an einem festen Punkt im Einsatzgebiet und das zweite befindet sich in der Rollbox und damit an der Position des Detektionssystems. Beide Module kommunizieren über eine UHF-Antenne miteinander. Mit der Software u-center von ublox werden die Module konfiguriert. Die Zuordnung Base und Rover lässt sich damit einfach einrichten, es müssen eine gemeinsame Baudrate und ein Protokoll gewählt werden, mit dem die Module untereinander über die UHF-Antenne (engl. Ultra High Frequency) kommunizieren. Auch welche Datenpakete übertragen werden sollen, muss ausgewählt werden. Eine gute Hilfe ist der beiliegende „Setup-Guide“, in dem alle notwendigen Schritte beschrieben sind [u-b]. Die Datenerfassung und Spannungsversorgung übernimmt ein Arduino. Es wurde auf eine Arduino-Bibliothek vom Hersteller zurückgegriffen.



Abbildung 3.5: ublox C94-M8P Quelle: [u-b]

Aerosoldaten werden mit dem Sensirion SPS30 (Abbildung 3.6) gemessen. Partikelgrößen zwischen  $0.3$  und  $10\text{ }\mu\text{m}$  lassen sich damit detektieren. Das Messprinzip basiert auf Laserstreuung. Diese Technologie ermöglicht präzise Messungen der Partikelgröße und -anzahl [Sen]. Über eine serielle Verbindung besteht eine Verbindung zum Arduino.



Abbildung 3.6: Sensirion Feinstaubsensor Quelle: [Sen]

### 3.1.2 Detektionssystem

Das Ausgangssignal des PMT oder PDA wird an einen Lock-in-Verstärker von der Firma FEMTO übertragen und verstärkt, gefiltert und durch das anliegende Referenzsignal der Signal-Hintergrund bereinigt (Abbildung 3.7). Als Referenz dient z. B. ein optischer Chopper oder ein modulierter (gepulster) Laser. Ein Lock-in-Verstärker stellt einen schmalbandigen Bandpassfilter dar und dient zur Messung eines schwachen elektrischen Wechsignals, das mit einem in Frequenz und Phase bekannten Referenzsignal moduliert ist. Als Ausgangssignal liefert er ein Gleichspannungssignal [FEM].

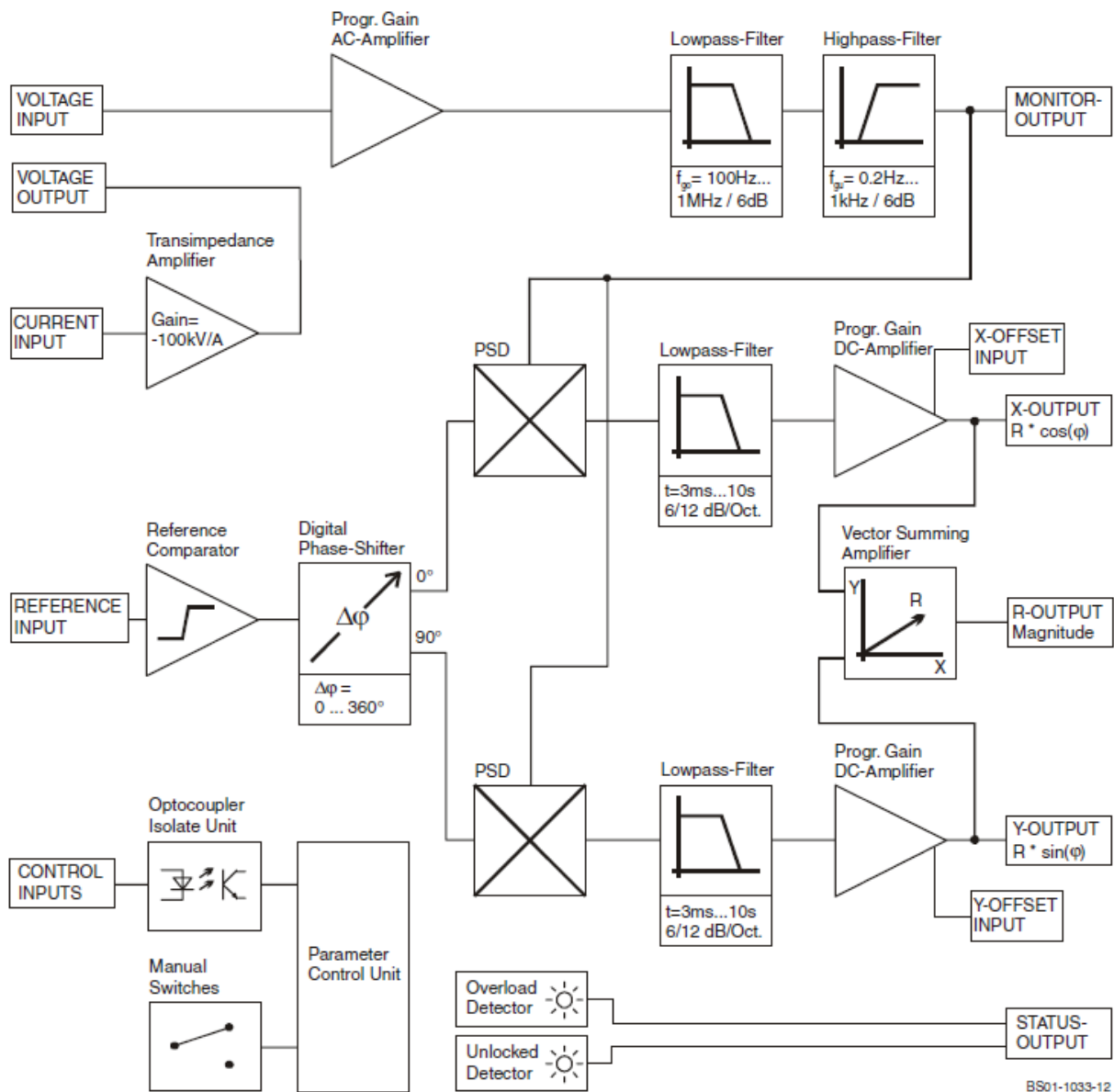


Abbildung 3.7: Blockschaltbild Lock-in-Verstärker Quelle: [FEM]

Nach dem Lock-in-Verstärker kommt ein Red Pitaya (Abbildung 3.8) zum Einsatz, der das Signal darstellt und als Oszilloskop arbeitet. Dies ist ein Einplatinenrechner, der auch als Signalgenerator und zur Frequenzanalyse genutzt werden kann. Auf der beiliegenden Speicherkarte befindet sich ein Programm mit einer GUI als Web-Anwendung. Da eine direkte Auswertung in Python erfolgen soll, wird auf das Open-Source Projekt „pyrpl“ von github zurückgegriffen [Neu]. Ein direktes Auslesen des FPGA (engl. Field Programmable Gate Array) mit Python ist so möglich. Die Eingänge können im Bereich 0-1 V oder 0-20 V arbeiten. Da der Lock-in-Verstärker bis zu 10 V ausgibt, wird im Bereich 0-20 V gearbeitet. In der Programmierung müssen ein Offsetwert und ein Kalibrierungsfaktor angewendet werden. Das Vorgehen dazu wird im Kapitel 4.2.1 beschrieben. Die Kommunikation mit dem Messrechner erfolgt über den Ethernet-Anschluss. Dafür muss dem Red Pitaya eine feste IP zugewiesen werden.

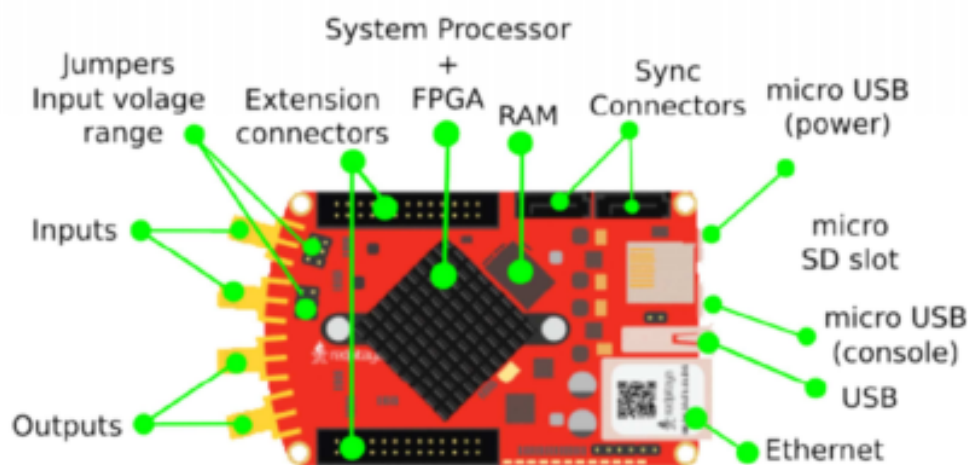


Abbildung 3.8: Red Pitaya Quelle: [Pit]

### 3.1.3 Kamerasystem und Ziellaser

Zur Zieljustierung wird ein 50 mW Justierlaser (Roithner Laser Technik GmbH, RLDD532-50-3) mit 532 nm verwendet und zur Zielerfassung eine Raspberry Pi Zero High Quality Kamera (Abbildung 3.9), die mit einem Weitwinkelobjektiv für nahe Objekte oder einem Teleobjektiv für entfernte Objekte ausgerüstet werden kann (Abbildung 3.10). Das Gehäuse wurde am 3D-Drucker aus PLA (Polymilchsäure) erzeugt. Die Datei zum Drucken des Gehäuses stammt von der Plattform [www.thingiverse.com](http://www.thingiverse.com) [Dan].



Abbildung 3.9: PI Zero HQ Camera mit Teleobjektiv Quelle: [Dan]

Der Raspberry Pi Zero wurde als USB Webcam eingerichtet, dazu wurde der „The Official Raspberry PI Camera Guide“ benutzt der zum Lieferumfang gehörte. Die Programmierung in Python erfolgte nach einem Online-Tutorial und wurde dann entsprechend dem Einsatzzweck modifiziert [MA].

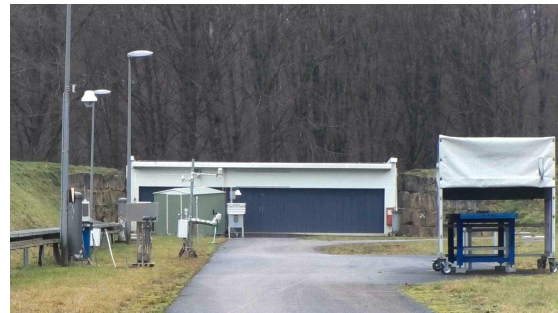


Abbildung 3.10: Pi Kamera mit Weitwinkelobjektiv (links) und Teleobjektiv (rechts)



## 3.2 Aufbau des optischen Systems

Der Aufbau des optischen Systems erfolgt in einem Tubus, der am PMT oder am PDA angebracht wird. Die Planung und Entwicklung wurde im Vorfeld der Arbeit durchgeführt. Im Inneren des Tubus befindet sich eine Käfig- bzw. Stangenkonstruktion, an der Linsen, Filter und eine Irisblende angebracht sind (Abbildung 3.11).

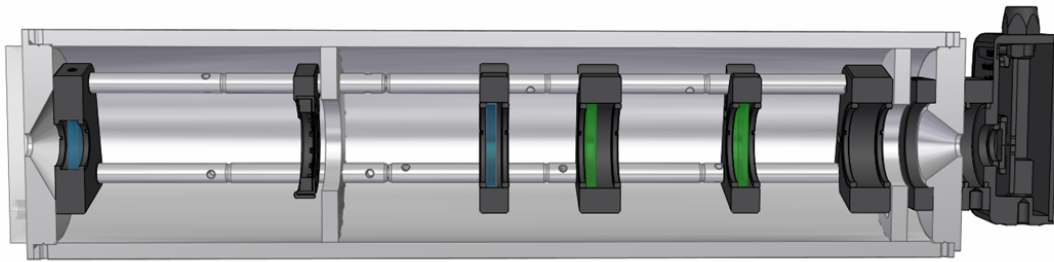


Abbildung 3.11: 3D Ansicht des Tubus mit PMT und PDA Quelle: [Pec+21]

Die einfallende Streustrahlung wird durch die Frontblende (Apertur) in das Innere des Tubus auf eine bikonvexe Linse geführt. Dort gebündelt und durch eine Irisblende, eine verstellbare Blende im Bereich von 0,8 bis 22 mm, auf eine zweite bikonvexe Linse gebracht. Der Strahl wird wieder parallelisiert und durch einen Langpassfilter (980nm), der bei Strahlung mit Wellenlängen kleiner als 980 nm eine hohe Opazität (Lichtundurchlässigkeit) besitzt, sowie einen Bandpassfilter (1030 nm), der nur für Strahlung bei einer Wellenlänge von 1030 nm eine hohe Transmission (Lichtdurchlässigkeit) hat, auf den PMT bzw. PDA geführt (Abbildung 3.12).

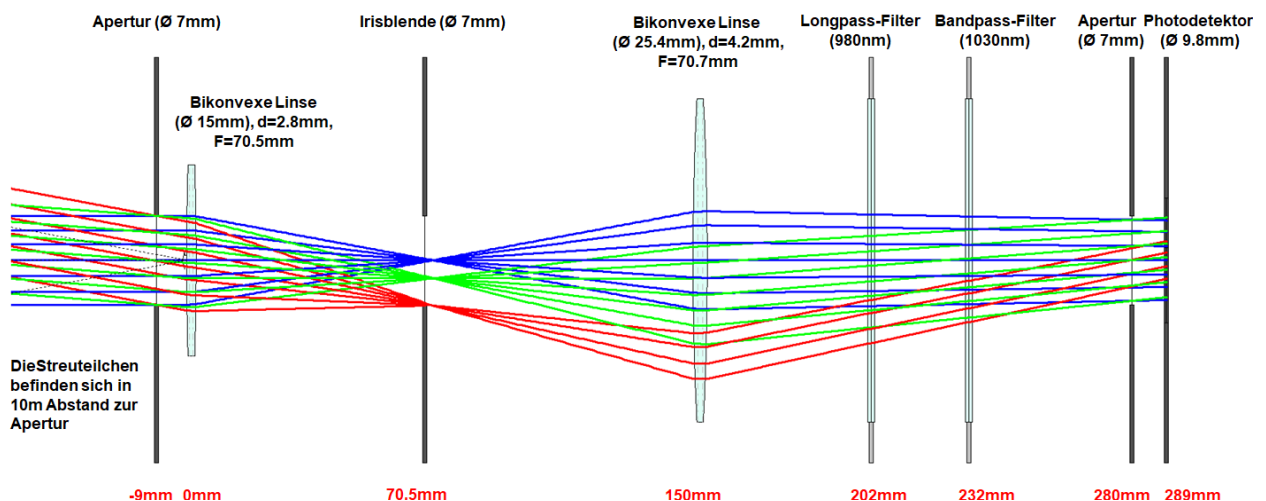


Abbildung 3.12: Optischer Aufbau des Systems Quelle: [Pec+21]

Der Tubus und die Aperturen sind aus Aluminium und wurden in der DLR-Zentralwerkstatt in Stuttgart gefertigt und anschließend extern schwarz eloxiert. Das Innere System ist aus Standard-Bauteilen von Thorlabs zusammengestellt, um jederzeit variabel anpassbar zu sein. Ein herausnehmbares Filtersystem (Abbildung 3.13) erlaubt ein schnelles Wechseln von Filter, um für jeden Einsatzbereich angepasst werden zu können.

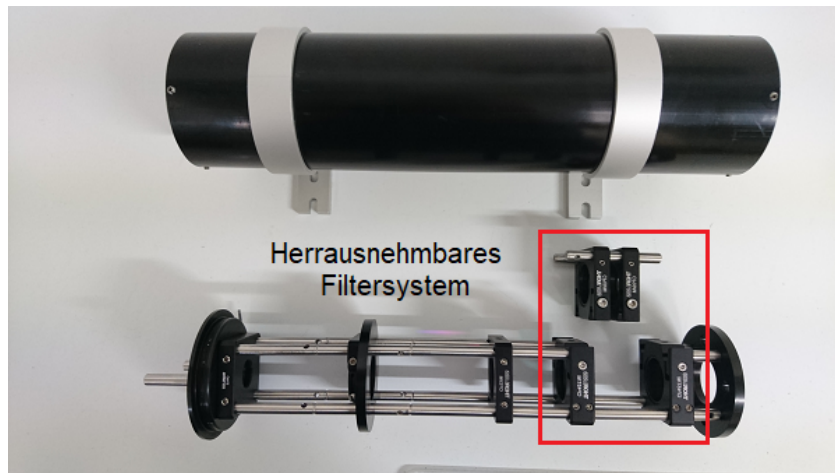


Abbildung 3.13: Tubus mit optischen System

### 3.3 Mechanisches System

Das Detektionssystem befindet sich in einem Wetterschutzgehäuse, während das elektrische System in einer mobilen Box (Brawer, V3615) untergebracht ist. Eine verbesserte Version des Wetterschutzgehäuses für den neuen Sensor ist derzeit im Bau befindlich (Abbildung 3.14).

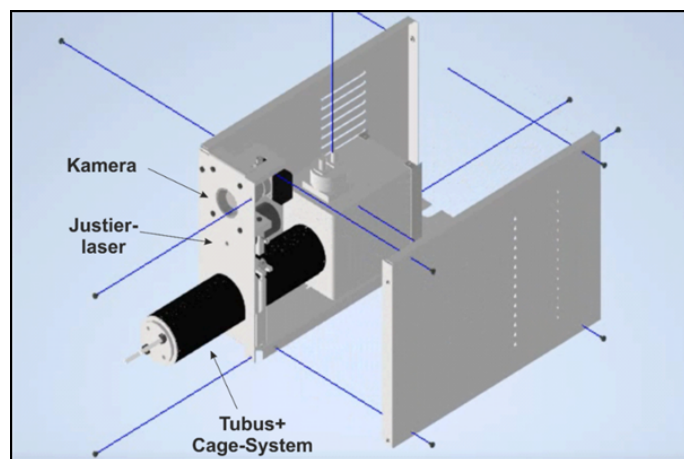


Abbildung 3.14: Neues Wetterschutzgehäuse Quelle [Pec+21]



Im derzeitigen Prototypenstadium wurde mit dem Wetterschutzgehäuse des vorhandenen TROS-Systems gearbeitet. In diesem befindet sich der Detektor (PMT oder PDA) an dem ein Tubus mit den optischen Komponenten angebracht ist. An dem Tubus sind die Kamera und der Justierlaser befestigt. Dazu wurde eine Halterung aus Aluminium, in Form eines Überwurfrings gefertigt. Bei dem neu geplanten Wetterschutzgehäuse wird sich dann alles im Gehäuse befinden.

In der Rollbox befindet sich die Elektronik zum Betreiben des Detektors, eine Elektronikbox (Abbildung 3.15) zur Sensoransteuerung und Datenanalyse und der Messrechner zur Datenaufzeichnung und -auswertung.

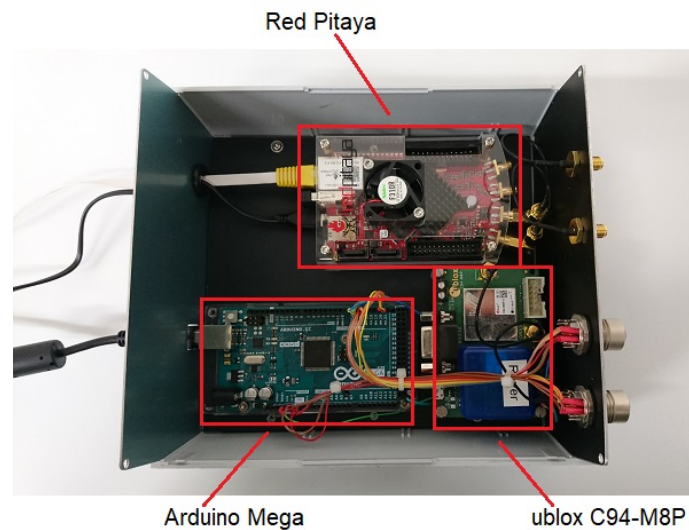


Abbildung 3.15: Elektronikbox mit Komponenten

An der Rückseite der Rollbox ist ein kleines Gehäuse befestigt in dem sich der Wetter- und Feinstaubsensor befindet und eine Halterung für die GPS und UHF Antenne (Abbildung 3.16).

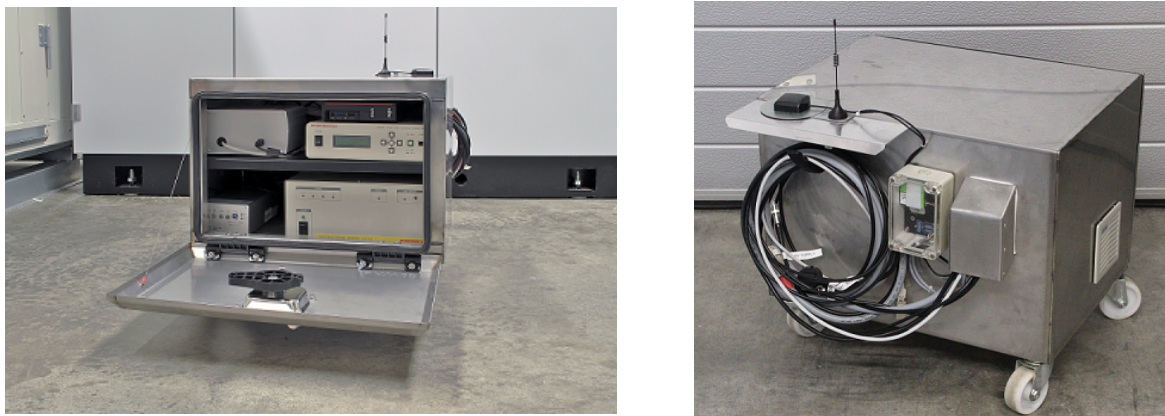


Abbildung 3.16: Rollbox Front- und Rückansicht mit Sensor-Gehäuse

Um das Detektionssystem zu charakterisieren wurde ein Streulichtmessaufbau entworfen, bei dem eine genaue Justierung von Einfalls- und Streuwinkel gewährleistet werden musste. Dazu wurden verschiedene Komponenten von der Firma Thorlabs bestellt, wie eine Rotationsplattform und eine Schiene mit Schienenschlitten (Abbildung 3.17). Um Störquellen zu beseitigen wurde ein lichtdichtes Gehäuse für den Laser-Arm angefertigt (Abbildung 3.18). Dieses besteht aus Aluminium-Blechen.

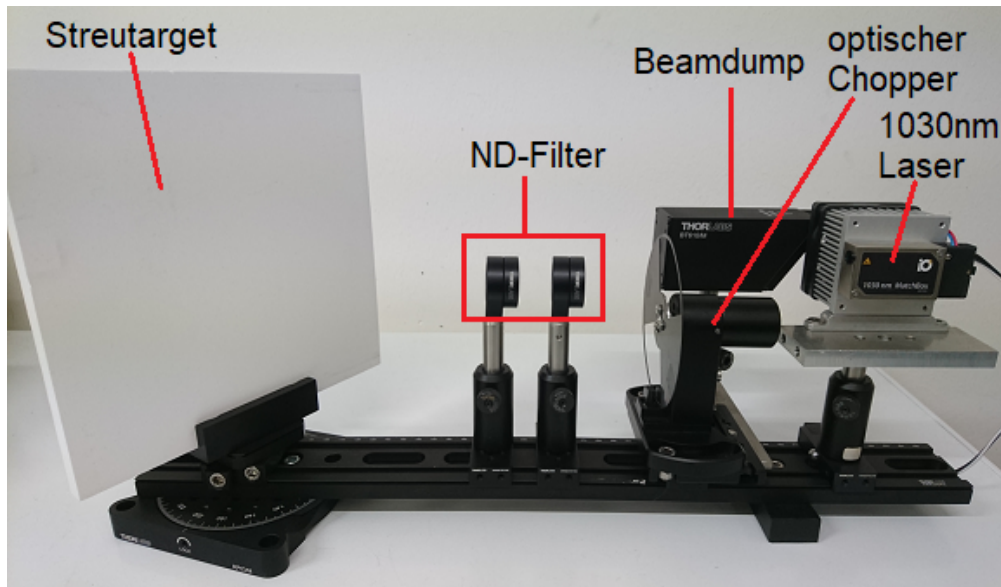


Abbildung 3.17: Streulichtaufbau mit Schienensystem

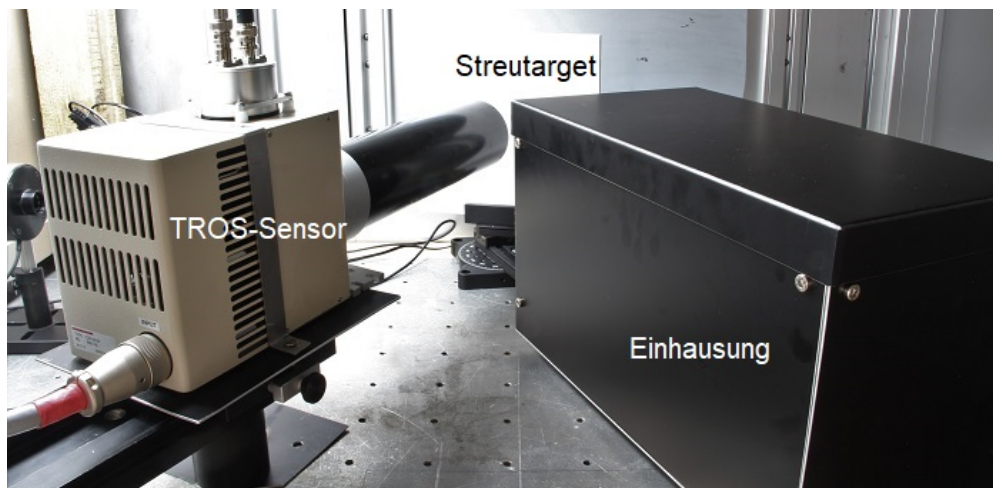


Abbildung 3.18: Streulichtaufbau in der Bearbeitungsbox

## 4 Kalibration

### 4.1 Kalibration der Ulbricht-Kugel

Zum Charakterisieren des Detektionssystems wird eine Ulbricht-Kugel von SpereOptics verwendet. Diese ist eine Sonderanfertigung mit einer Beschichtung aus Spectralon. Die Reflektivität ändert sich über einen Bereich von 350 nm bis 1650 nm kaum (Lambertsche Strahler).

Für die Streulichtmessung wird als Strahlungsquelle ein Laser der Firma Integrated Optics mit einer Wellenlänge von 1030 nm benutzt. Vor der Kalibrierung der Detektionssysteme muss der Proportionalitätsfaktor  $K_{1030}$  zwischen dem gemessenen Strom am Photodetektor und der Strahldichte auf der Innenseite der Kugeloberfläche ermittelt werden. Dieser ergibt sich aus der Kalibrierung der Ulbricht-Kugel mit einem Spektroradiometer (Spectral Evolution, PSR+3500). Das Vorgehen zum Kalibrieren der Ulbrichtkugel basiert auf einer technischen Dokumentation von Carsten Pargmann, die am DLR in Lampoldshausen am Institut für Technische Physik - Atmosphärische Propagation durchgeführt wurde [Par18].

Da bei der Kalibrierung der Ulbricht-Kugel mit externer Laserquelle kein Spektralfilter benutzt wurde, ergibt sich der Proportionalitätsfaktor  $K_{1030}$  direkt aus dem Verhältnis der bei der Kalibrierung der Ulbricht-Kugel gemessenen integrierten Strahldichte und dem Detektorstrom. Bei einem Ausgangsportdurchmesser von 38 mm beträgt der Proportionalitätsfaktor.

$$K_{1030} = 345485 \left[ \frac{W}{m^2 sr A} \right] \quad (4.1)$$

Der gesamte Strahlungsfluss auf einen an der Ulbricht-Kugel montierten Photodetektor  $\phi_d$  [W] wird durch die Strahldichte  $L_S$  auf der Kugeloberfläche, der aktiven Fläche des Detektors  $A_d$  [m<sup>2</sup>] und dem Projektionswinkel  $\Omega$  [sr] bestimmt. Wird für den Proportionalitätsfaktor  $K_{1030}$  der Wert aus Gleichung 4.1 eingesetzt ergibt sich:

$$\varphi_d = I_K \cdot K_{1030} \cdot A_d \cdot \Omega = I_K \cdot 1,205 \cdot 10^{-6} [W] \quad (4.2)$$

Die Umrechnung einer vom Red Pitaya gemessenen Spannung  $U$  in eine Leistungsangabe erfolgt dann mit:

$$\varphi_d = 1,205 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{I_K}{U_K} \cdot U_d [W] \quad (4.3)$$

$I_K$  und  $U_K$  bezeichnen Strom und Spannung, die während der Kalibrierung des Detektionssystems am Photodetektor mit dem Oszilloskop bzw. mit dem Red Pitaya gemessen wurden. Mit dem Umrechnungsfaktor aus Gleichung 4.3 werden alle optischen Verluste innerhalb des Detektionssystems mit berücksichtigt.

## 4.2 Kalibration des Einplatinenrechners

Um eine hohe Genauigkeit in der Spannungsmessung mit dem Red Pitaya zu erhalten, wurde er kalibriert (Abbildung 4.1). Dazu wurde ein Mess- und Kalibriergerät von PreciCal und ein Labor Digital Oszilloskop von Agilent Technologies, das InfiniiVision verwendet. Die Spannung wurde dabei Schrittweise erhöht und das Ergebnis vom Red Pitaya mit dem des Digital Oszilloskop verglichen. So konnte sowohl der Offset-Wert als auch der Kalibrierungsfaktor ermittelt werden, die in der Python-Programmierung angewendet wurden.

Der ermittelte Offsetwert für den Eingang IN1 beträgt 0,0048 und der Faktor ist 29,02157869.

Tabelle 4.1: Vergleich des Red Pitaya mit dem Labor Oszilloskop

Kalibriergerät	Spannung in [V]							
	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	2	4
Oszilloskop	0,028	0,230	0,430	0,630	0,820	1,028	2,003	4,028
Red Pitaya	0,001	0,2	0,401	0,604	0,804	1,005	2,008	4,017

Kalibriergerät	6	8	10	12	14	16	18	20
Oszilloskop	6,028	8,01	10,04	12,035	14,073	16,03	18,02	20, 05
Redaktion	6,024	8,034	10,045	12,059	14,053	16,09	18,111	20,141

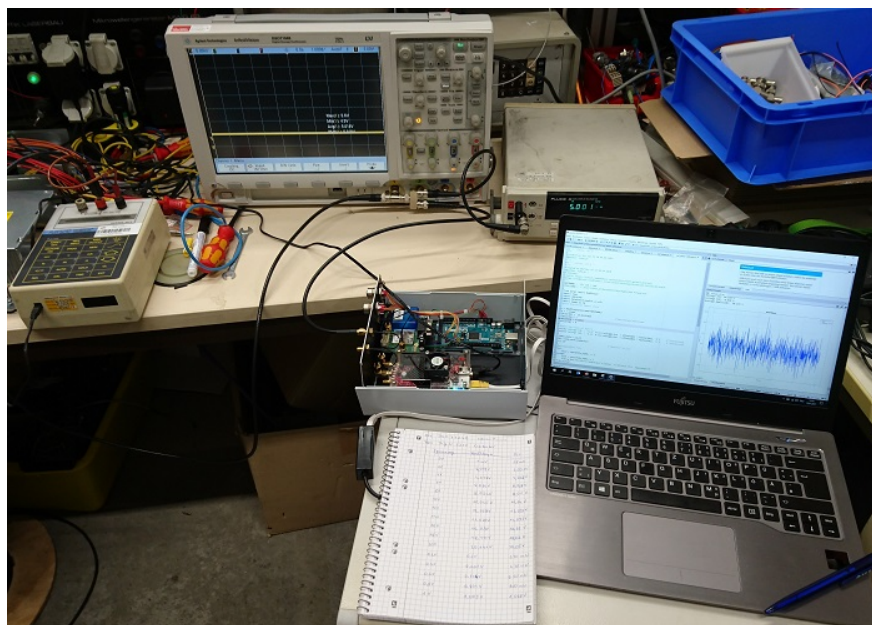


Abbildung 4.1: Kalibration des Red Pitaya mit Labornetzteil und -oszilliskop



## 4.3 Kalibration der Detektionssysteme

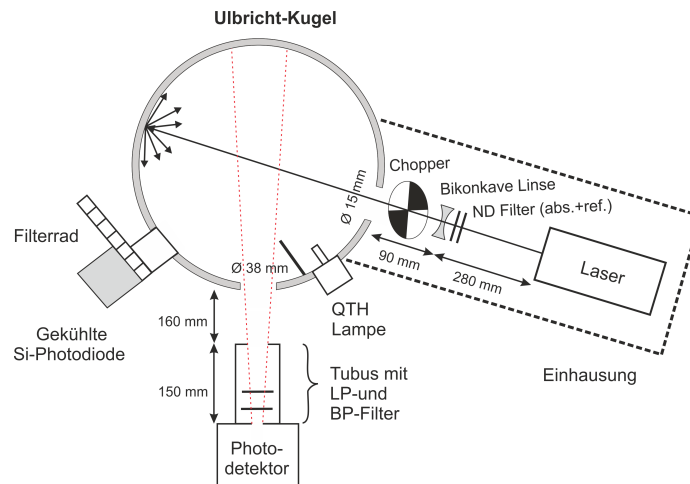


Abbildung 4.2: Aufbau mit Ulbrichtkugel Quelle: [Pec+21]

Bei den Detektionssystemen mit PMT, wurden alle Sensitivitätseinstellungen am Lock-in-Verstärker kalibriert. Bei dem PDA wurde eine feste Sensitivität eingestellt und alle Gain-Einstellungen kalibriert. Die Zeitkonstante des Lock-in-Verstärkers war 300 ms, die Hochspannungsversorgung des PMT ist -800 V. Für jede Einstellung wurden 3 Messungen über jeweils 30 s durchgeführt und gemittelt. Die Ergebnisse werden in Tabellen und Diagrammen dargestellt.

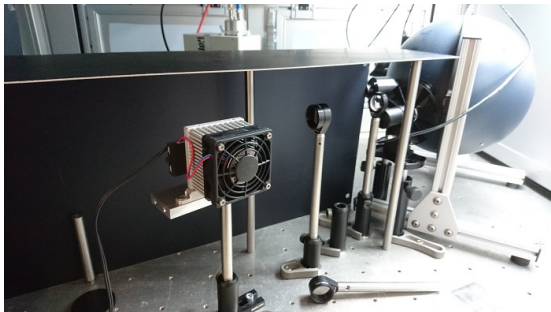


Abbildung 4.3: Experimenteller Aufbau in der Bearbeitungsbox. Links: Laserarm, Rechts: Detektorarm

Der Aufbau erfolgt, in einer lichtdichten Bearbeitungsbox, die im Labor M70 aufgebaut wurde (Abbildung 4.2). Die Komponenten im Laserarm sind ein Laser von Integrated Optics mit 1030 nm Wellenlänge und einer Leistung von 470 mW, ein reflektierender und ein absorbierender Neutral-dichte (ND) Filter, ein optischer Chopper und eine bikonkave Linse. Es wurde je ein Durchgang mit beiden Filtern, einer mit nur dem reflektierenden (Thorlabs, ND20A) und einer nur mit dem absorbierenden (Thorlabs, NE30A) Filtern durchgeführt. Im Detektorarm befindet sich der Detektor mit Tubus (Abbildung 4.3). Im Tubus befindet sich ein Langpass- (980 nm) und ein Bandpassfilter (1030 nm). Diese Kalibration wurde mit allen Detektionssystemen durchgeführt.

### 4.3.1 Bestehendes System mit PMT

Die aufgenommenen Messwerte wurden mit Python grafisch (Abbildung 4.4) dargestellt und die Messwerte für die Konfiguration mit beiden Filtern im Laserarm in Tabellenform (Tabelle 4.2). Die Werte in den Spalten  $I/U$  und  $\varphi_d/U$  wurden später für die Leistungsberechnung gebraucht. Ausführliche Ergebnisse sind im Anhang zu finden.

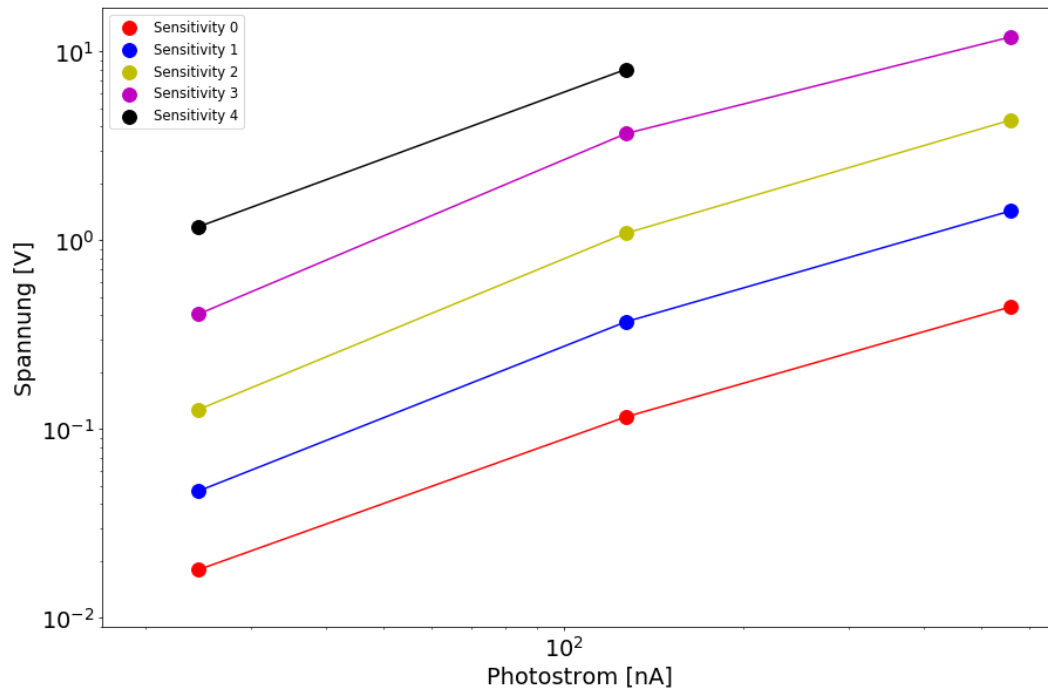


Abbildung 4.4: Kalibration des vorhandenen Systems mit PMT

Tabelle 4.2: Kalibrierung vorhandenes System mit PMT

Sensitivität	Filter im Laserarm ND20A und NE30A			
	Spannung [V]	Strom [A]	$I/U$ [ $\frac{A}{V}$ ]	$\varphi_d/U$ [ $\frac{W}{V}$ ]
0	0,018667	$2,45 \cdot 10^{-8}$	$1,31 \cdot 10^{-6}$	$5,47 \cdot 10^{-7}$
1	0,047667	$2,45 \cdot 10^{-8}$	$5,14 \cdot 10^{-7}$	$2,14 \cdot 10^{-7}$
2	0,127333	$2,45 \cdot 10^{-8}$	$1,92 \cdot 10^{-7}$	$8,01 \cdot 10^{-8}$
3	0,407333	$2,45 \cdot 10^{-8}$	$6,01 \cdot 10^{-8}$	$2,50 \cdot 10^{-8}$
4	1,181	$2,45 \cdot 10^{-8}$	$2,07 \cdot 10^{-8}$	$8,64 \cdot 10^{-9}$
5	3,934667	$2,45 \cdot 10^{-8}$	$6,23 \cdot 10^{-9}$	$2,59 \cdot 10^{-9}$
6	7,793	$2,45 \cdot 10^{-8}$	$3,14 \cdot 10^{-9}$	$1,31 \cdot 10^{-9}$

### 4.3.2 Neues System mit PMT

Der neue Tubus mit verbesserter Optik und PMT wurde mit den gleichen Einstellungen wie das vorhandene System kalibriert. Die dabei aufgenommenen Werte sind wieder grafisch (Abbildung 4.5) und in Tabellenform (Tabelle 4.3) dargestellt.

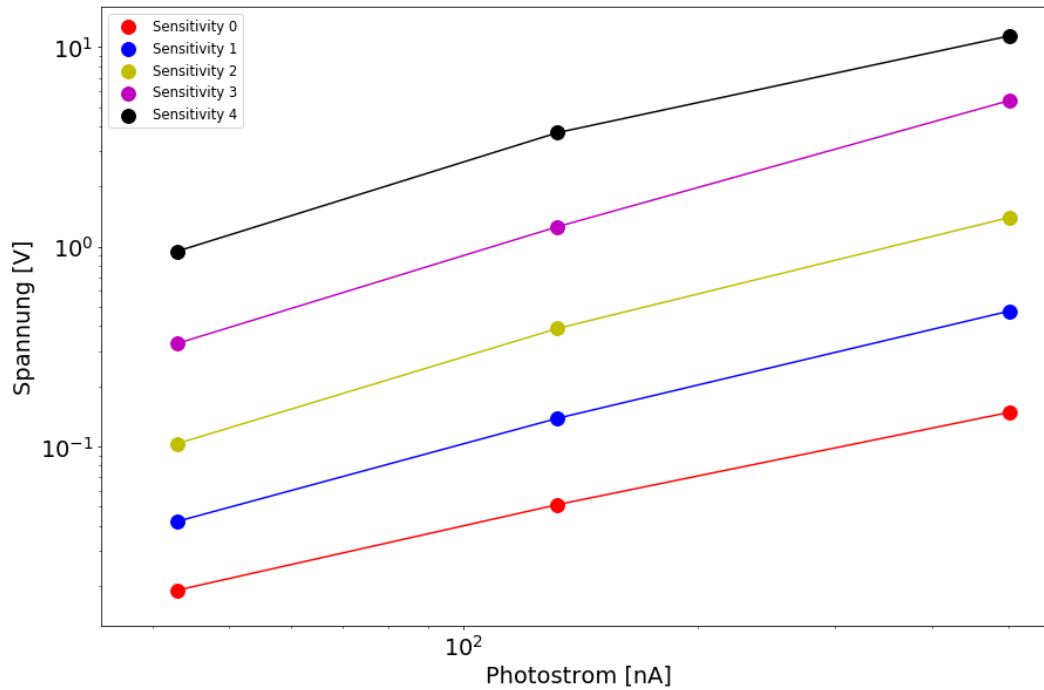


Abbildung 4.5: Kalibration des neuen Systems mit PMT

Tabelle 4.3: Kalibrierung neues System mit PMT

Sensitivität	Filter im Laserarm ND20A und NE30A			
	Spannung [V]	Strom [A]	$I/U$ [ $\frac{A}{V}$ ]	$\varphi_d/U$ [ $\frac{W}{V}$ ]
0	0,019333	$4,29 \cdot 10^{-8}$	$2,22 \cdot 10^{-6}$	$9,24 \cdot 10^{-7}$
1	0,042333	$4,29 \cdot 10^{-8}$	$1,01 \cdot 10^{-6}$	$4,22 \cdot 10^{-7}$
2	0,103667	$4,29 \cdot 10^{-8}$	$4,14 \cdot 10^{-7}$	$1,72 \cdot 10^{-7}$
3	0,327333	$4,29 \cdot 10^{-8}$	$1,31 \cdot 10^{-7}$	$5,46 \cdot 10^{-8}$
4	0,947	$4,29 \cdot 10^{-8}$	$4,53 \cdot 10^{-8}$	$1,89 \cdot 10^{-8}$
5	3,129	$4,29 \cdot 10^{-8}$	$1,37 \cdot 10^{-8}$	$5,71 \cdot 10^{-9}$
6	7,716	$4,29 \cdot 10^{-8}$	$5,56 \cdot 10^{-9}$	$2,32 \cdot 10^{-9}$

### 4.3.3 Neues System mit PDA

Der PDA hat die Besonderheit, dass er einen Transimpedanz-Verstärker mit sieben Gain-Einstellungen besitzt. Die Verstärkung wurde allein über den PDA gesteuert. Auch hier wieder eine grafische (Abbildung 4.6) und tabellarische (Tabelle 4.3) Darstellung.

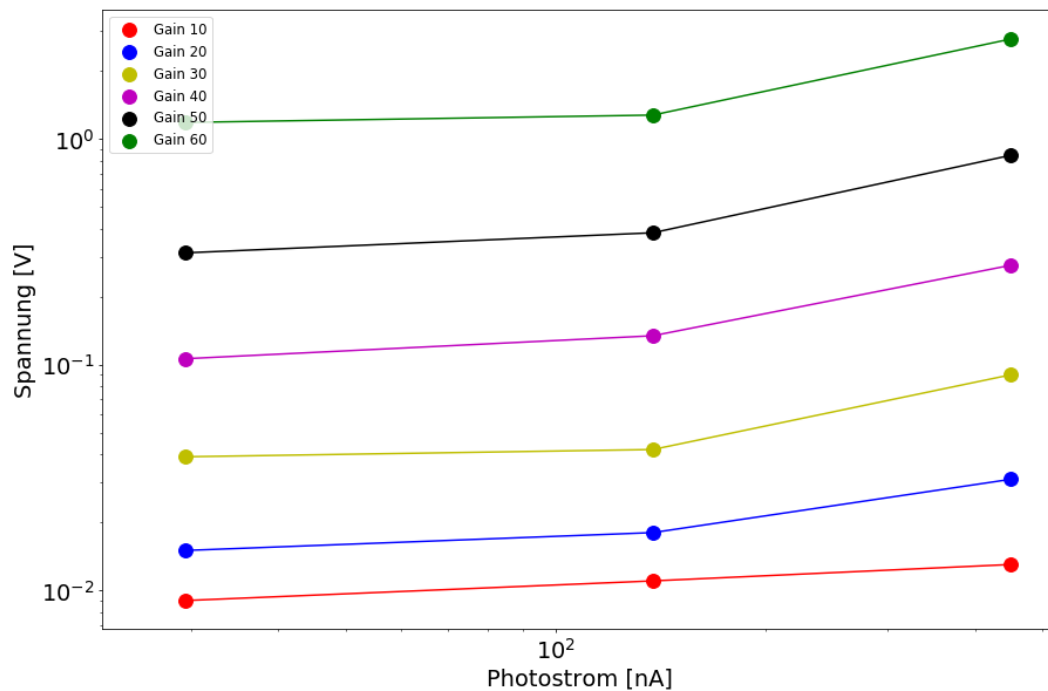


Abbildung 4.6: Kalibration des neuen Systems mit PDA

Tabelle 4.4: Kalibrierung neues System mit PDA

Filter im Laserarm ND20A und NE30A				
Gain [dB]	Spannung [V]	Strom [A]	$I/U$ [ $\frac{A}{V}$ ]	$\varphi_d/U$ [ $\frac{W}{V}$ ]
0	0,009333	$2,94 \cdot 10^{-8}$	$3,15 \cdot 10^{-6}$	$3,15 \cdot 10^{-6}$
10	0,014667	$2,94 \cdot 10^{-8}$	$2,00 \cdot 10^{-6}$	$2,00 \cdot 10^{-6}$
20	0,037333	$2,94 \cdot 10^{-8}$	$7,86 \cdot 10^{-7}$	$7,86 \cdot 10^{-7}$
30	0,105333	$2,94 \cdot 10^{-8}$	$2,79 \cdot 10^{-7}$	$2,79 \cdot 10^{-7}$
40	0,330667	$2,94 \cdot 10^{-8}$	$8,88 \cdot 10^{-8}$	$8,88 \cdot 10^{-8}$
50	1,113667	$2,94 \cdot 10^{-8}$	$2,64 \cdot 10^{-8}$	$2,64 \cdot 10^{-8}$
60	3,447	$2,94 \cdot 10^{-8}$	$8,52 \cdot 10^{-9}$	$8,52 \cdot 10^{-9}$



## 5 Durchführung

Um Streuleistungen zu detektieren wurde mithilfe der Erkenntnisse aus der Kalibrierung, ein Streulichtaufbau realisiert und die Hintergrundstrahlung auf der Freistrahlstrecke gemessen. Die erhaltenen Daten erlauben eine Charakterisierung des Systems. Mit den Ergebnissen aus Kapitel 4.3 und den Formeln aus Kapitel 2.3 können aus den ermittelten Spannungswerten die Leistung (Formel 5.1) und die BRDF (Formel 2.7) bestimmt werden.

$$\varphi_d = U_d \cdot \left( \frac{I_K}{U_K} \right) \cdot K_{1030} \cdot A_d \cdot \Omega \quad (5.1)$$

Der Wert für  $\frac{I_K}{U_K}$  wurde in Kapitel 4.3 ermittelt. Für jede Sensitivität und Konfiguration von Filtern ist dort ein Wert angegeben. Der Wert  $K_{1030}$  wurde in Kapitel 4.1 berechnet.  $A_d = 3,84845 \cdot 10^{-5} m^2$  ist die Fläche, die durch die Detektorfläche mit  $d=7mm$  gegeben ist und der Raumwinkel ist durch  $\Omega = \pi \cdot \frac{1}{2}(1 - \cos(2 \cdot 100 mrad)) = 0,03132 sr$  definiert.

Zur Berechnung der BRDF wird die Formel aus Kapitel 2.3 verwendet. Die ermittelte Leistung  $\varphi_d$  wird durch die Leistung des Lasers ( $\varphi_{Laser}$ ) an der Streulichtplatte, den differentiellen Raumwinkel  $d\Omega = \frac{\pi \cdot d^2}{4 \cdot r^2} = 9,62 \cdot 10^{-4} sr$  und  $\cos(\vartheta_s)$  ( $\vartheta_s$  ist der Streuwinkel) geteilt.

$$BRDF = \frac{\varphi_d}{\varphi_{Laser} \cdot d\Omega \cdot \cos(\vartheta_s)} \quad (5.2)$$

Für die Streulichtexperimente wurden für diffuse Reflexionen, eine Platte aus Optopolymer (Sphäre Optics, OPST200.200.10-99.U.O) und für spekulardiffuse Reflexionen eine Platte aus maschinell hergestellten Aluminium (Fa. Schneider) verwendet (Abbildung 5.1).

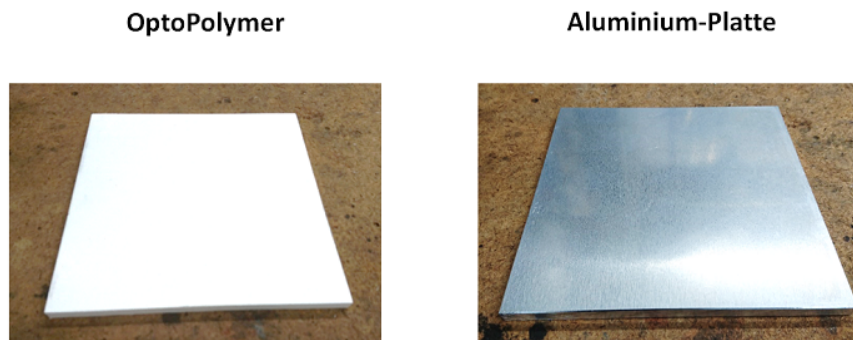


Abbildung 5.1: Probenmaterial für Streulichtexperimente

Optopolymer® ist eine eingetragene Marke. Es ist ein optisches PTFE, das in einem speziellen Herstellungsverfahren durch isostatisches Verdichten des Ausgangsmaterials hergestellt wird. Es besitzt ein optisch konstant verlaufendes Reflexionsspektrum und hat ein Lambertsches Reflexionsverhalten (BRDF).

## 5.1 Testmessung

Um erste Erfahrungen mit dem Detektionssystem zu sammeln, wurde ein Testaufbau mit der Streulichtplatte (Optopolymer) aufgebaut (Abbildung 5.2). Der 1030 nm Laser aus dem Kalibrationsaufbau dient als Laserquelle, ein reflektierender (ND20A) und ein absorbierender (NE30A) Filter, sowie ein Modulator (Optischer Chopper) bilden den Laserarm. Als Detektor wurde das vorhandene System mit PMT verwendet.

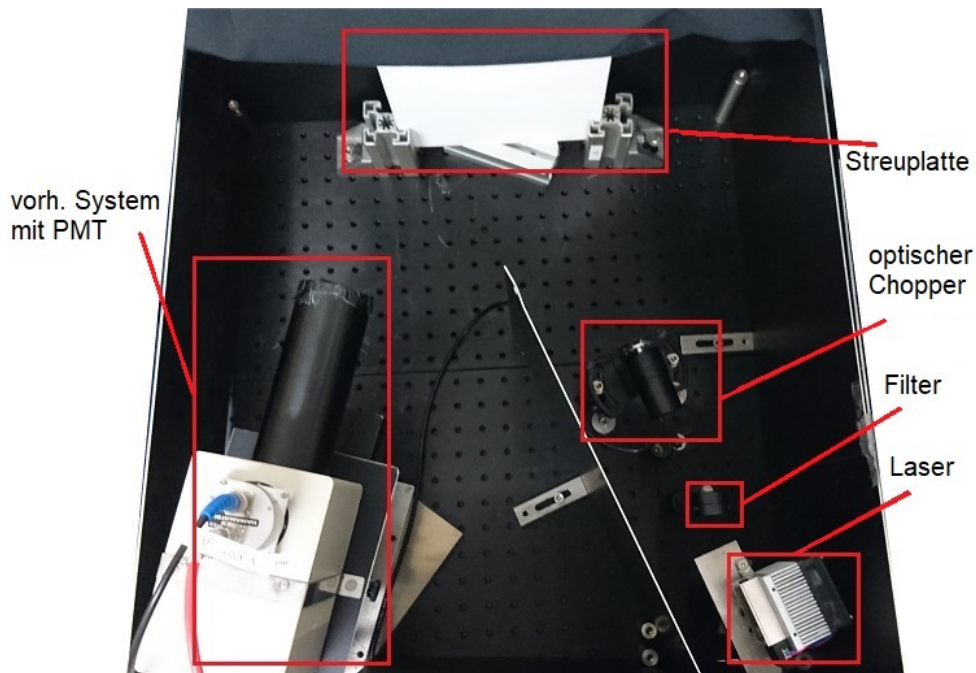


Abbildung 5.2: Einfacher Streulichtaufbau auf Breadboard

Die hierbei gewonnenen Erfahrungen waren hilfreich für den späteren Messaufbau in der Bearbeitungsbox. Es stellte sich heraus, dass die Winkeländerung des Einfall- und Ausfallwinkels mit hohem Aufwand verbunden sind. Zur Verfügung standen hier ein Gliedemaßstab und ein Winkelmesser. Der begrenzte Platz erlaubte nur wenige Messpunkte, die nur mit aufwendigen Umbauten möglich waren. Die Wiederholgenauigkeit war dadurch nur begrenzt gegeben. Doch es ergaben sich wichtige Hinweise im Umgang mit dem PMT, was Einstellungen am Lock-in-Verstärker und an der Hochspannungsversorgung betraf. Auch gab es Einblicke in das Vorgehen bei der anschließenden Datenauswertung. Es wurden Messungen zur Winkel- und Abstandsabhängigkeit durchgeführt. Die gewählten Einstellungen waren wie folgt:

- Hochspannungsversorgung: -800 V (Hamamatsu, C9525 Series)
- Lock-in-Verstärker: Zeitkonstante=300 ms, Sensitivität=4 (FEMTO, LIA-MVD-200-L)
- Optischer Chopper: Blade=50% (Thorlabs, MC1F10), Frequenz=20 Hz (Thorlabs, MC2000)

## 5.2 Streulichtmessung in der Bearbeitungsbox

Für den Messaufbau in der Bearbeitungsbox wurde eine optimierte Konstruktion des Laserarms benutzt (Abbildung 5.3). Sie erlaubte eine leichte und präzise Verstellung des Einfallswinkels (Streuwinkel). Der gesamte Laserarm befindet sich dabei in einem lichtdichten Gehäuse, um störendes einfallendes Licht zu minimieren. Ein Beam Dump fing die Reflexionen der Filter auf, um weitere Störquellen zu beseitigen. Die Komponenten waren wie in der Testmessung: Ein 1030 nm Laser, ein reflektierender (ND20A) und ein absorbierender (NE30A) Filter und ein Modulator. Um die Leistung des Lasers zu bestimmen, wurde ein Messgerät von Ophir verwendet, es besteht aus einem Handgerät (Vega) und einem Detektorkopf (3A und 3A-P-THz).

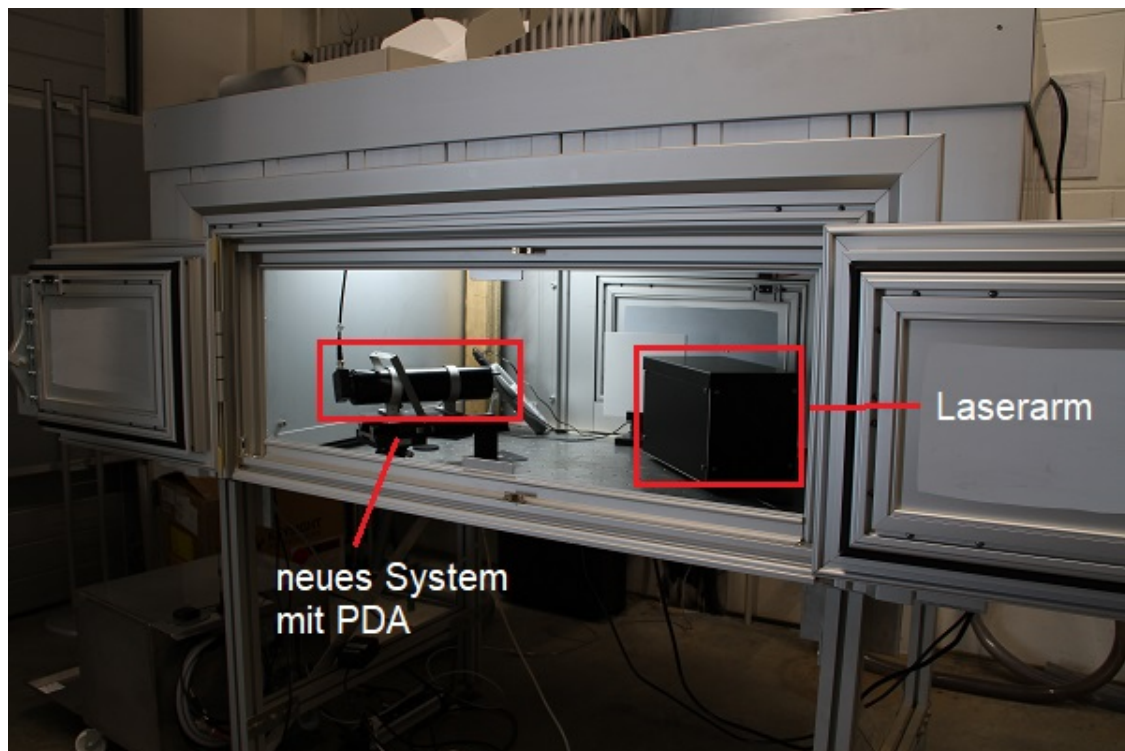


Abbildung 5.3: Aufbau in der Bearbeitungsbox mit PDA

Mit diesem Aufbau konnten verschiedene Streuplatten untersucht werden, die in einer rotierenden Halterung befestigt waren. Durch die Verstellung der Halterung wurde der Einfallswinkel des Lasers verändert. Dazu wurde ein Digitalwinkelmesser genutzt, damit konnte für den Einfallswinkel eine 0,1 Grad Auflösung erreicht werden. Das Detektionssystem wurde in einem Streuwinkel von  $0^\circ$  ausgerichtet und verschraubt. Dann konnte durch Drehen des gesamten Laserarms mit der Rotation-Stage der Streuwinkel von 0 bis  $90^\circ$  abgetastet werden. Als Streuplatten diente eine polierte Aluminiumplatte für spekulardiffuse und eine Platte aus Optopolymer für diffuse Reflexion. Bei der spekulardiffusen Platte wurde alle  $5^\circ$  eine Messung durchgeführt und um den spiegelnden Bereich alle  $1^\circ$ . Bei der diffusen Platte wurde alle  $5^\circ$  eine Messung durchgeführt.

Nach den Messungen zur Winkelabhängigkeit wurde eine zweite Messung zur Überprüfung der Abstandsabhängigkeit durchgeführt. Dabei wurde das Detektionssystem in unterschiedlichen Abständen zur Streuplatte ausgerichtet. Als Streuplatte wurde die Aluminiumplatte verwendet. Diese

Messung diene dazu eine  $\frac{1}{r^2}$  Abhängigkeit zu überprüfen.

Die Messungen zur Winkelabhängigkeit wurden mit allen drei Messsystemen durchgeführt. Bei der Aluminium-Streuplatte wurde ein Einfallswinkel von 30 und 40° eingestellt, bei der Optopolymer-Streuplatte ein Einfallswinkel von 40°. Bei den vorher durchgeführten Tests lieferten diese Winkeleinstellungen die besten Ergebnisse. Der Abstand zwischen Detektor und Streuplatte betrug 20 cm. Die Einstellungen der Messtechnik waren bei der Streuplatte aus Optopolymer wie folgt:

- Hochspannungsversorgung: -800 V (Hamamatsu, C9525 Series)
- Lock-in-Verstärker: Zeitkonstante=300 ms, Sensitivität=4 und 5 (FEMTO, LIA-MVD-200-L)
- Modulator: Blade= 50% (Thorlabs, MC1F2), Frequenz=20 Hz (Thorlabs, MC2000)

Bei der Aluminiumplatte wurde die Sensitivität des Lock-in-Verstärkers auf Stufe 0 gesetzt, die restlichen Einstellungen wurden beibehalten.

Die Abstandsabhängigkeit wurde mit dem neuen System mit PMT durchgeführt. Das Detektionssystem war dazu auf einer Schiene montiert die eine Bewegung zur Streuplatte erlaubte. Folgende Einstellungen wurden verwendet:

- Hochspannungsversorgung: -800 V (Hamamatsu, C9525 Series)
- Lock-in-Verstärker: Zeitkonstante=300 ms, Sensitivität=3 (FEMTO, LIA-MVD-200-L)
- Modulator: Blade= 50% (Thorlabs, MC1F2), Frequenz=20 Hz (Thorlabs, MC2000)

## 5.3 Hintergrundmessung auf der Freistrahlstrecke

Neben den Messungen im Labor wurden Messungen auf der Freistrahlstrecke durchgeführt (Abbildung 5.4). Diese Messungen dienten hauptsächlich dazu die Sensorik zu testen und auszuwerten. Sie wurden aber auch genutzt, um atmosphärische Hintergrundstrahlung zu messen und so die Detektoren zu testen.

Die gewonnenen Messdaten für die Sensorik halfen dabei die Programmierung zu verbessern. Die Messungen liefen immer über mehrere Tage und zeigten so auch wie zuverlässig und ausfallsicher das System ist. Um Aussagen darüber zu treffen, wie hoch die Genauigkeit der Sensoren ist, wurden sie mit Messdaten anderer Systeme verglichen, die sich auf der Freistrahlstrecke befinden. Die Messsysteme dort werden für atmosphärische Beobachtungen und für Messungen mit dem Hochenergielaser genutzt.

Die Hintergrundstrahlungsmessungen zeigten die Stärke der Sonneneinstrahlung zum Zeitpunkt der Messung. Je nach Ausrichtung und Bewölkung wurden unterschiedliche Zeitverläufe aufgezeichnet. Mit allen drei Detektionssystemen wurden diese Messungen durchgeführt.



Abbildung 5.4: Aufbau des TROS-Sensors auf der Freistrahlstrecke

## 6 Ergebnisse

Im diesem Kapitel werden die Messergebnisse dargestellt. Es wurde für jede Messung ein Diagramm ausgewählt und erläutert, die Erläuterung lässt sich auf alle anderen Messungen der Messreihe übertragen. Weitere Ergebnisse befinden sich im Anhang.

### 6.1 Testmessung

Zur Überprüfung der Winkelabhängigkeit wurden Streuwinkel von 15 bis 30°, in 5° Schritten, eingestellt. Der Einfallswinkel des Lasers war bei 20°. Die dabei gemessene Spannung wurde zum Winkel aufgetragen (Abbildung 6.1).

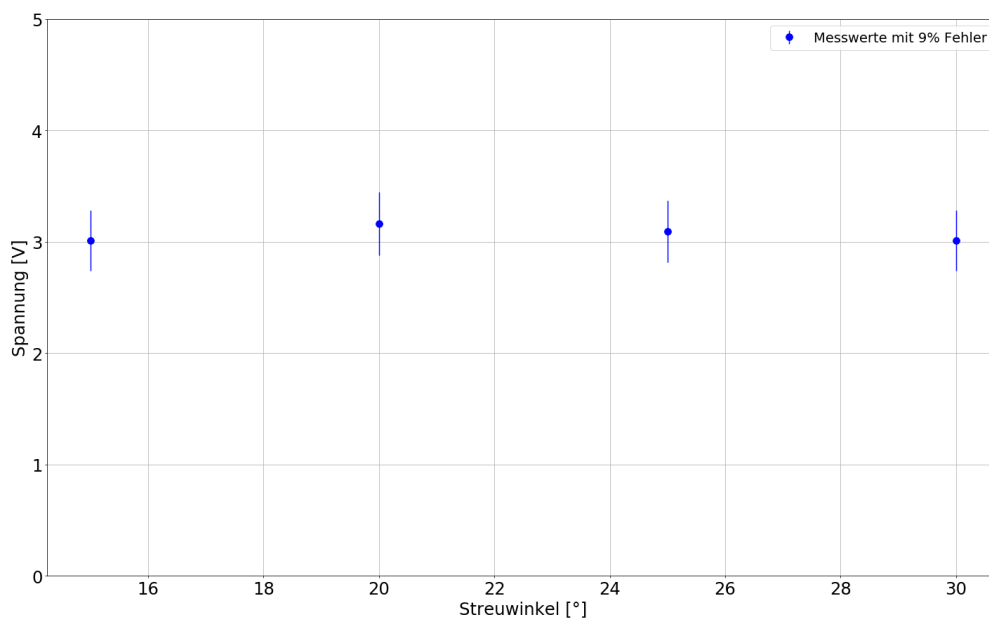


Abbildung 6.1: Winkelabhängigkeit des vorhandenen Systems

Bei dieser Messung zeigte sich, wie wichtig eine genaue Ausrichtung des Lasers und des Detektionssystems waren. Bei einer geringen horizontalen oder vertikalen Abweichung vom einfallenden Laserpunkt auf der Streuplatte zum Bereich den der Detektor erfasst, kommt es zu großen Unterschieden in den ermittelten Messwerten. Dies macht die Wiederholgenauigkeit der Messwerte fast unmöglich, da die Justierempfindlichkeit zu hoch ist.



Um eine Abstandsabhängigkeit zu untersuchen wurde ein Einfallswinkel von  $0^\circ$  und ein Streuwinkel von  $40^\circ$  eingestellt. Anschließend wurde der Detektor in einer Entfernung von 10, 15 und 20 cm zur Streuplatte aufgestellt (Abbildung 6.2).

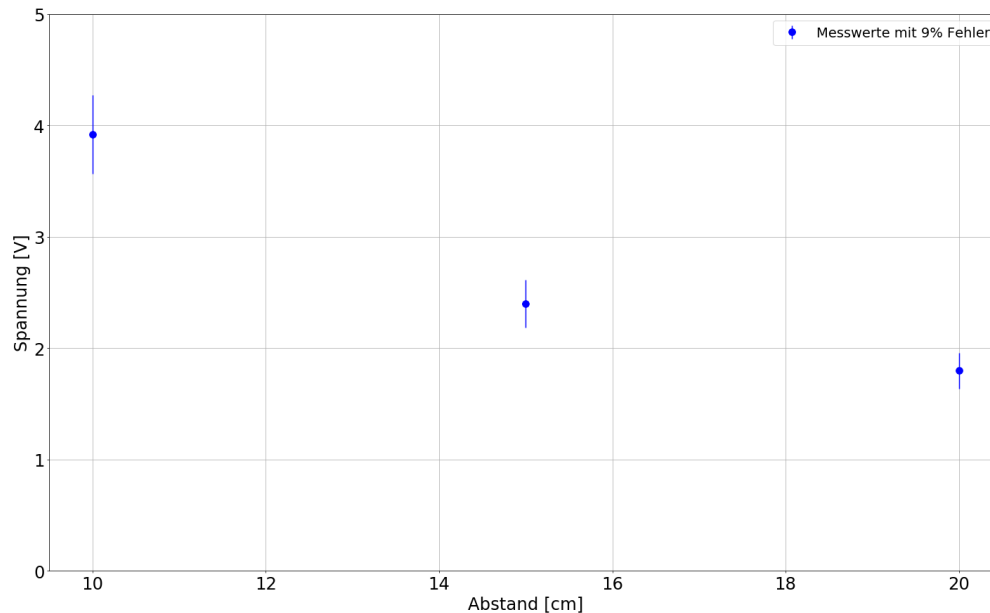


Abbildung 6.2: Abstandsabhängigkeit des vorhandenen Systems

Auch bei dieser Messung war die genaue Ausrichtung des Detektors wichtig, nur wenn er genau auf den einfallenden Laserpunkt auf der Streuplatte gerichtet war, konnten wiederholbare Messwerte aufgenommen werden. Durch den eingeschränkten Platz waren nur drei Messpunkte möglich. Doch es zeigte sich, dass mit größerem Abstand die detektierte Spannung vom PMT abnahm. Ob eine  $\frac{1}{r^2}$  Abhängigkeit besteht, muss jedoch weiter untersucht werden. Dazu muss ein verbesserter Aufbau benutzt werden, der mehr Messpunkte zulässt und die Ausrichtung des Detektors erleichtert. Nur wenn sehr kleine und auch große Abstände möglich sind, kann das Abstandsgesetz überprüft werden.

## 6.2 Streulichtmessungen in der Bearbeitungsbox

### 6.2.1 Winkelabhängigkeit bei Optopolymer

Durch den verbesserten Aufbau bei der Messung, konnten Streuwinkel von 0 bis 80°, in 5 ° Schritten, eingestellt werden. Bei der Streuplatte aus Optopolymer wurde ein Einfallswinkel von 40° gewählt. Am Lock-in-Verstärker war Sensitivität 4 eingestellt. Die gemessene Spannung wurde direkt in eine Leistung umgerechnet. Der dafür benötigte Faktor aus Abschnitt 4.3.1 lautet  $P/U = 8,64 \cdot 10^{-09} < \frac{W}{V}$ .

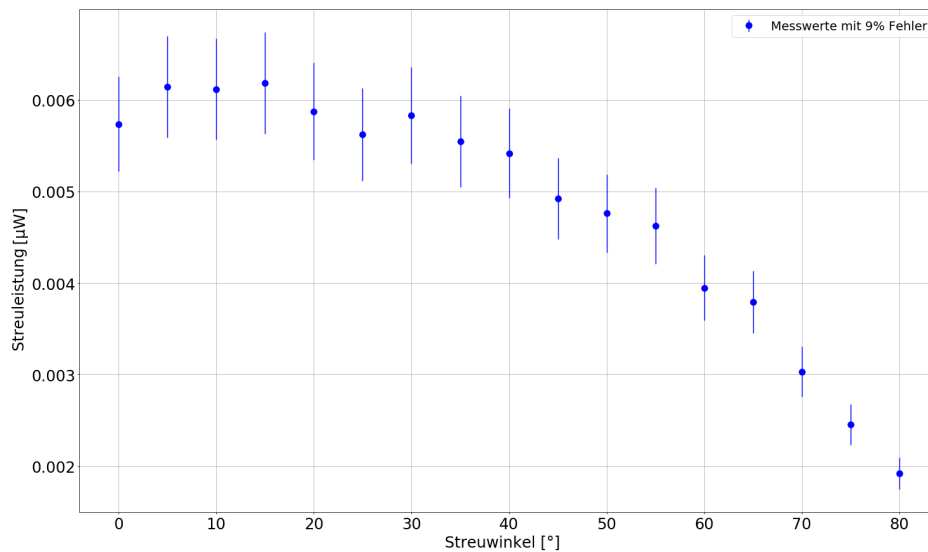


Abbildung 6.3: Winkelabhängigkeit des vorhandenen Detektionssystems mit PMT

Für jede Winkeleinstellung wurden drei Messungen durchgeführt, von denen der Mittelwert gebildet wurde. Durch die Kalibration und Messung ergibt sich ein statistischer Fehler von 9 % der als Fehlerbalken dargestellt ist. 7 % sind von Proportionalitätsfaktor  $K_{1030}$  und 2 % sind durch die Streuung der Messwerte.



Anschließend wurde die Leistung in eine BRDF umgerechnet (Abbildung 6.4). Dazu muss der Raumwinkel  $d\Omega$  bestimmt und der Streuwinkel  $\vartheta$  mit einbezogen werden. Das Vorgehen ist am Anfang von Kapitel 5 beschrieben. Die Darstellung erfolgt als Kosinus korrigierte BRDF.

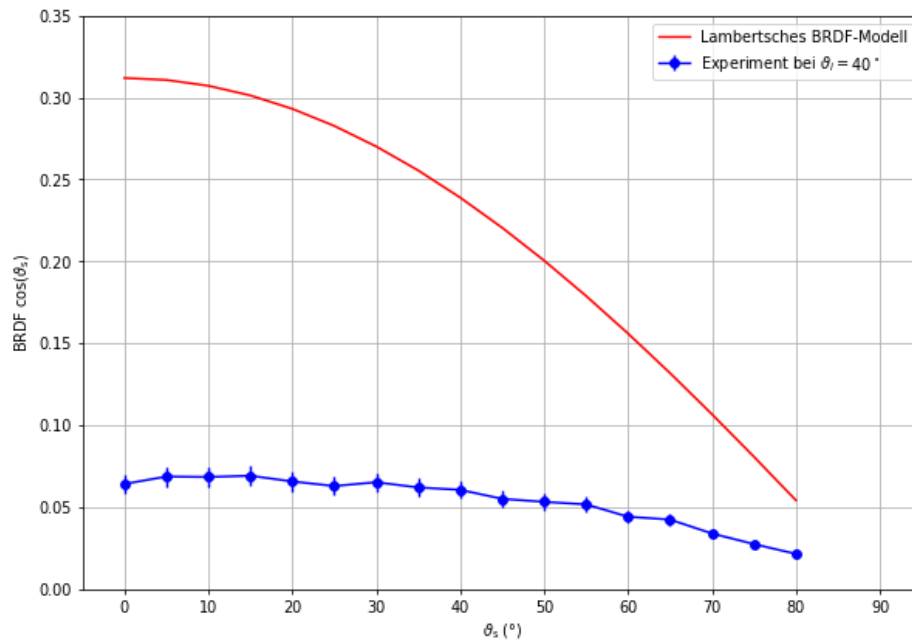


Abbildung 6.4: BRDF bei Winkelabhängigkeit mit vorhandenem Detektionssystem

Die rote Kurve zeigt das Lambertsche BRDF-Modell [Ger]. Eine ideal diffus reflektierende Oberfläche hat eine Reflektivität von 1, eine ideal absorbierende 0. Eine Reflektivität von 1 geteilt durch  $\pi$  ergibt die BRDF für einem Lambertschen Strahler. Hier wurde eine Reflektivität von 0,98 bei 1030 nm verwendet, die sich aus dem Datenblatt der Probe ergibt. Die Laserleistung an der Streuplatte betrug 0,093 mW für den Detektorkopf Ophir 3A-P-THz. Mit dem Detektorkopf 3A wurde die Leistung 0,224 mW erfasst. Für die Berechnung wurde die Laserleistung 0,093 mW verwendet.

Bei dem neuen Detektionssystem mit PMT (Abbildung 6.5) wurde Sensitivität 5 eingestellt. Die Leistungsberechnung erfolgte mit dem Faktor  $P/U = 5,71 \cdot 10^{-09} \frac{W}{V}$  aus Kapitel 4.3.2.

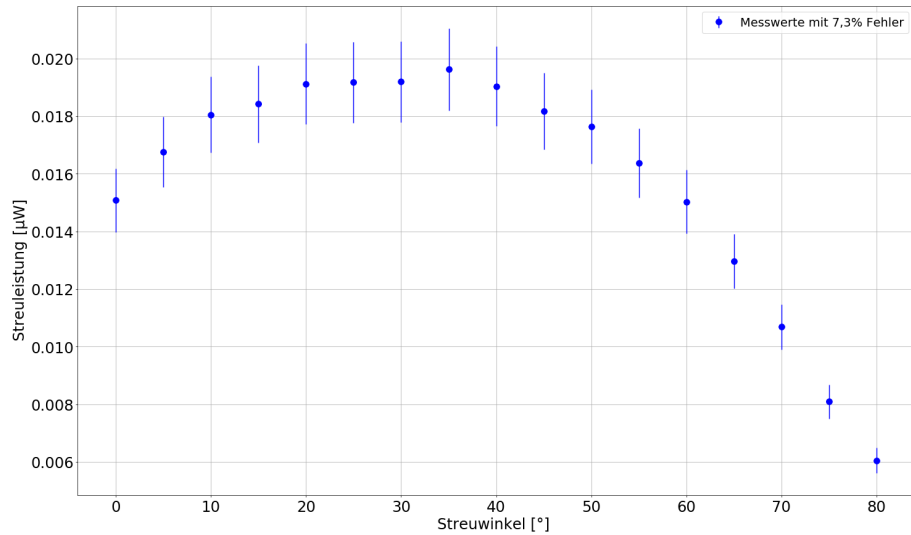


Abbildung 6.5: Winkelabhängigkeit des neuen Detektionssystems mit PMT

Die ermittelten Werte ergaben einen unerwarteten Verlauf, daher wurde die Messung bei Sensitivität 4 wiederholt. Der Faktor für die Leistungsberechnung ist hier  $P/U = 1,89 \cdot 10^{-08}$ .

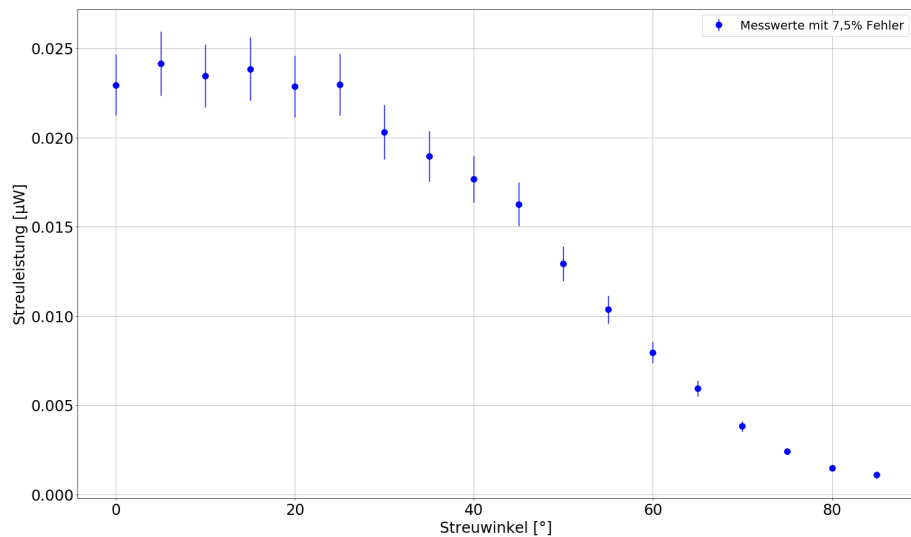


Abbildung 6.6: Winkelabhängigkeit des neuen Detektionssystems mit PMT

Durch die Kalibration des Systems und der Faktoren die daraus ermittelt wurden, sollte die Leistung bei beiden Messungen gleich sein, was nicht ganz zu trifft.

Die Leistung in eine BRDF umgerechnet ergibt folgenden Verlauf (Abbildung 6.7).

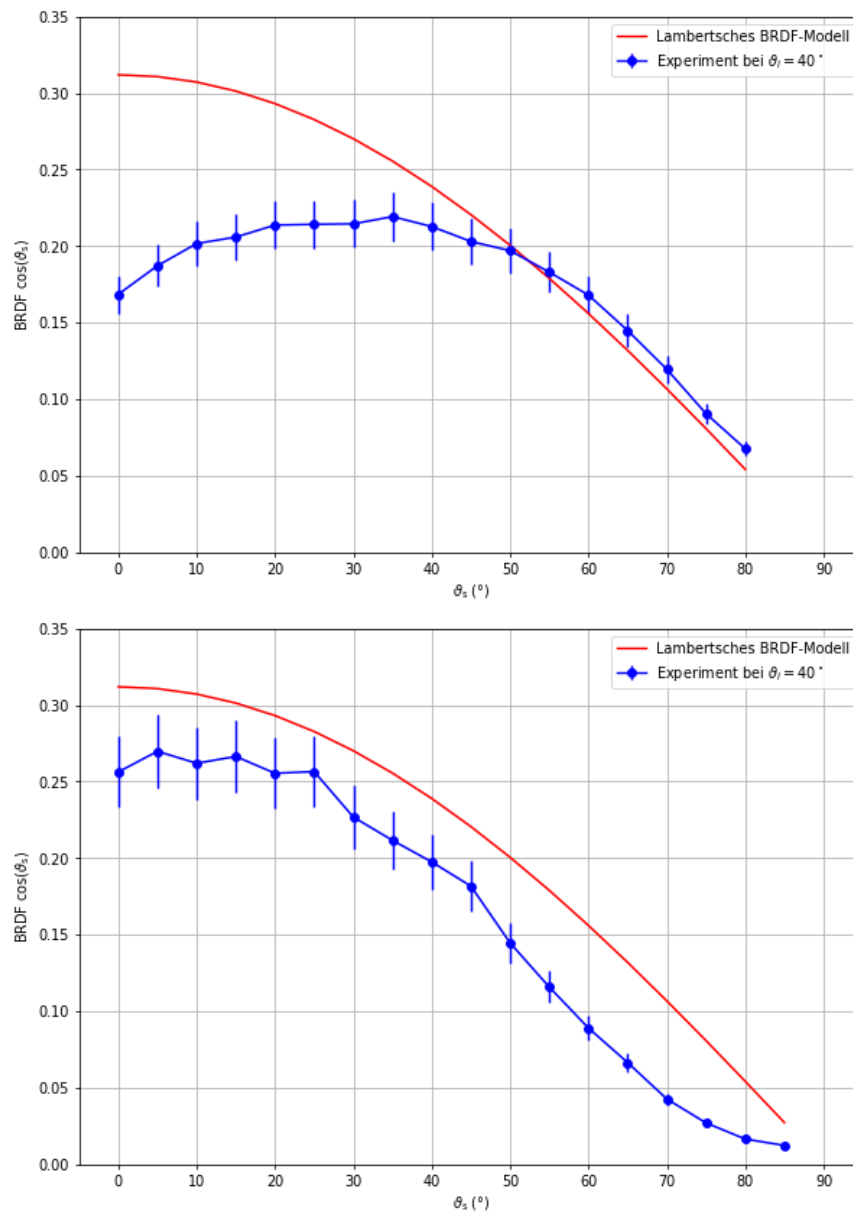


Abbildung 6.7: BRDF bei Winkelabhängigkeit mit neuen Detektionssystem mit PMT

Das Ergebnis bei Sensitivität 4 nähert sich dem Modell besser an. Daraus lässt sich ein Einfluss der Verstärkung des Lock-in-Verstärkers auf das Ergebnis zeigen. Für die Berechnung wurde mit dem Detektorkopf 3A-P-THz eine Laserleistung von 0,093 mW ermittelt. Mit dem Detektorkopf 3A ergaben sich 0,27 mW. Die Berechnung der BRDF erfolgte mit der Leistung des Detektorkopf 3a-P-THz.

Für das neue Detektionssystem mit PDA ergibt sich ein Verlauf ähnlich zu den anderen. Die Sensitivität des Lock-in-Verstärkers war bei 5. Die Gain-Einstellung am PDA war auf 50 dB eingestellt. Eine Leistungsberechnung war nicht möglich, da mit diesen Einstellungen keine Kalibrierung durchgeführt wurde. Aus diesem Grund wird nur der Spannungsverlauf dargestellt.

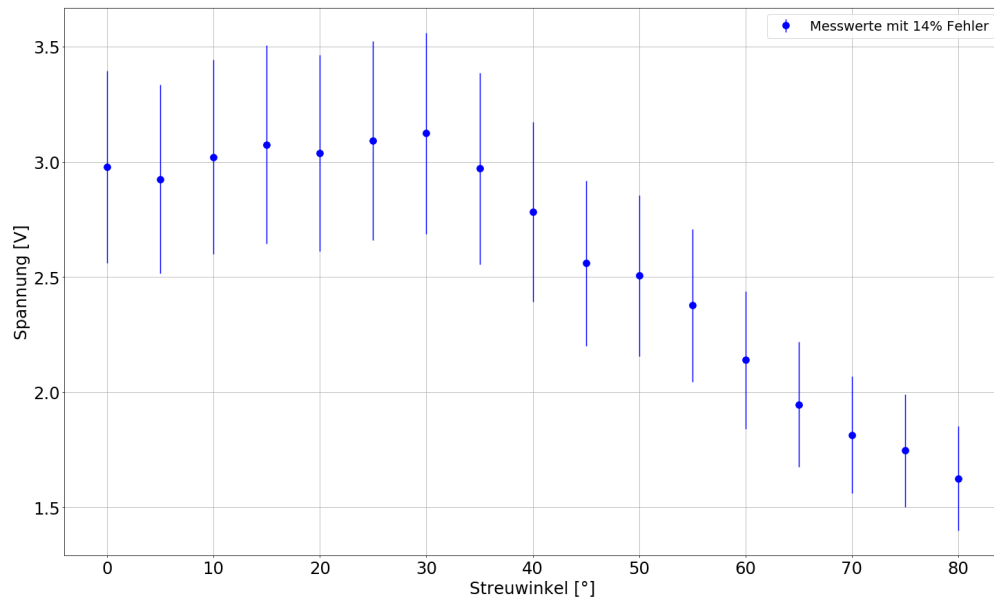


Abbildung 6.8: Winkelabhängigkeit des neuen Detektionssystems mit PDA

Der statistische Fehler ist bei dem PDA sehr groß. Die Verstärkung des Lock-in-Verstärker und die des PDA verstärken das Signal doppelt, wodurch es zu einer höheren Standardabweichung in den Messwerten kommt.

### 6.2.2 Winkelabhängigkeit bei Aluminium

Bei der Aluminiumplatte wurde die Abtastung angepasst, um den Streuwinkel mit der größten spiegelnden Reflexion zu bestimmen (Abbildung 6.9). Die Sensitivität des Lock-in-Verstärkers war auf Stufe 0 eingestellt und es wurde nur das neue Detektionssystem mit PMT verwendet.

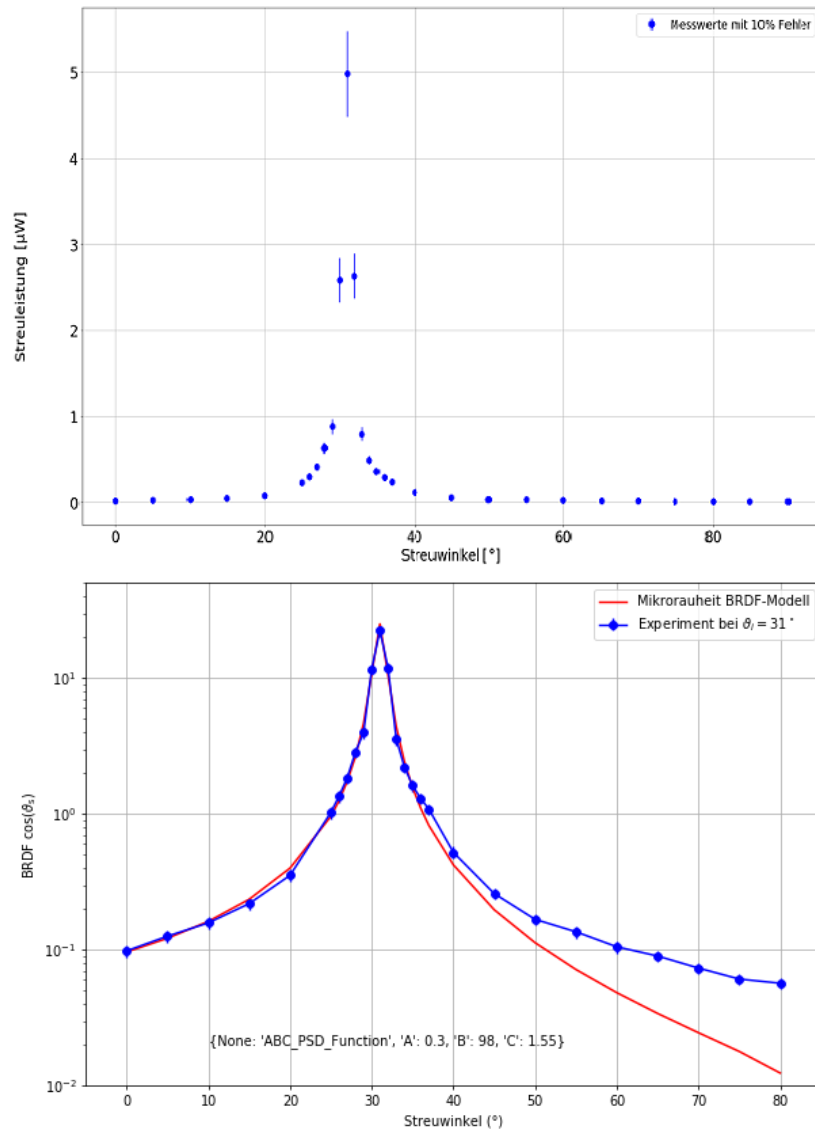


Abbildung 6.9: Winkelabhängigkeit bei Aluminium mit 30° Einfallswinkel

Ein deutliches Maximum lässt sich bei 31° ermitteln, nach dem Reflexionsgesetz eine Abweichung von 1°. Bei Winkeln über 40° weichen die Messwerte zunehmend vom berechneten Mikrorauheit BRDF-Modell ab [Ger]. Ursache dafür ist der begrenzte dynamische Bereich des Detektors, der durch die gewählte Sensitivität nur eine bestimmte Größenordnung aufweist. Die berechnete BRDF verfügt über einen größeren Dynamikbereich. Der RMSE-Wert war bei 0.229 1/sr. Es gab einen statistischen Fehler von 10 %, 7 % aus dem Proportionalitätsfaktor  $K_{1030}$  und 3 % durch Streuung der Messwerte.

Die Messung wurde bei einem Einfallswinkel von  $40^\circ$  wiederholt (Abbildung 6.10).

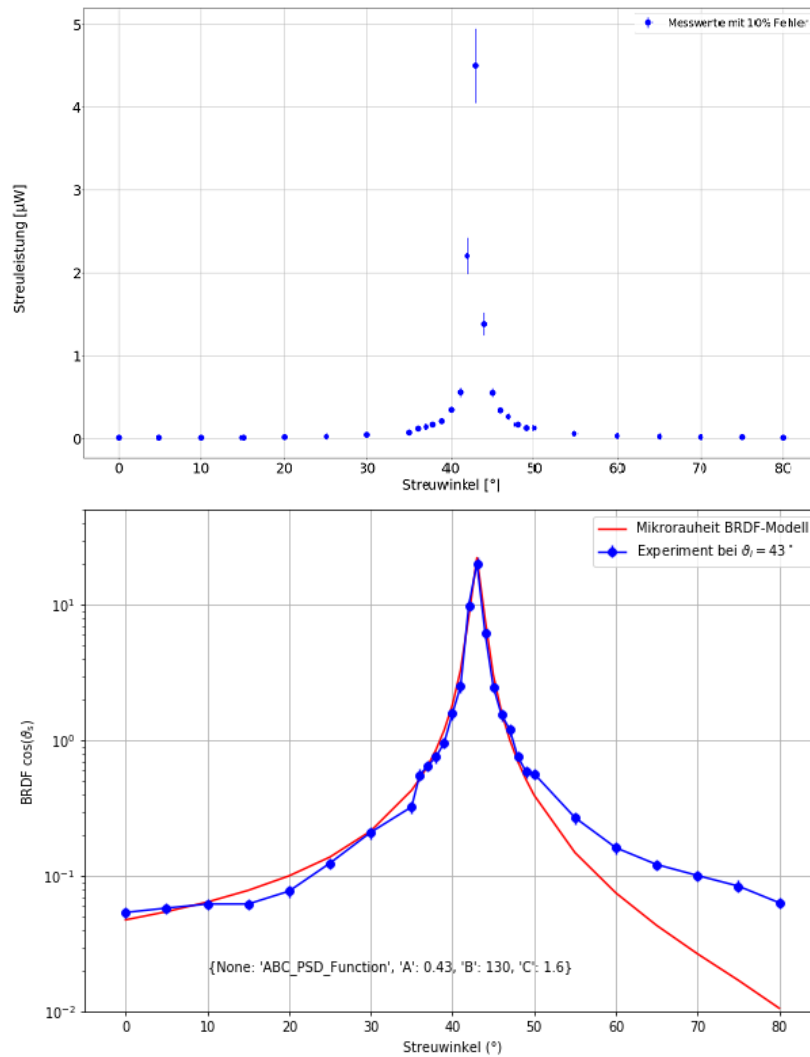


Abbildung 6.10: Winkelabhängigkeit bei Aluminium mit  $40^\circ$  Einfallswinkel

Auch hier gab es ein deutliches Maximum, dies war bei  $43^\circ$ . Nach dem Reflexionsgesetz eine Abweichung von  $3^\circ$  vom erwarteten Wert. Die Einstellung des Einfallswinkels, durch Drehen der Halterung für die Streuplatte, ist die wahrscheinlichste Fehlerquelle für diese Abweichung. Auch hier ist eine Abweichung bei größeren Winkeln vom Modell zu sehen, was durch den begrenzten Dynamikbereich bei einer bestimmten Sensitivität des Detektors zu erklären ist. Der RMSE-Wert war bei  $0.258 \text{ 1/sr}$ .  $0,093 \text{ mW}$  wurde als Laserleistung für die Berechnung verwendet. Das Experiment sollte mit einer anderen Probe wiederholt werden.

### 6.2.3 Abstandsabhängigkeit

Mit dem verbesserten Aufbau war es möglich, die Abstandsabhängigkeit erneut zu überprüfen (Abbildung 6.11). Es konnten Abstände zwischen Detektor und Streuplate von 5 bis 30 cm, in 5 cm Schritten, gemessen werden. Der Streuwinkel war auf  $35^\circ$  eingestellt und der Einfallswinkel auf  $40^\circ$ .

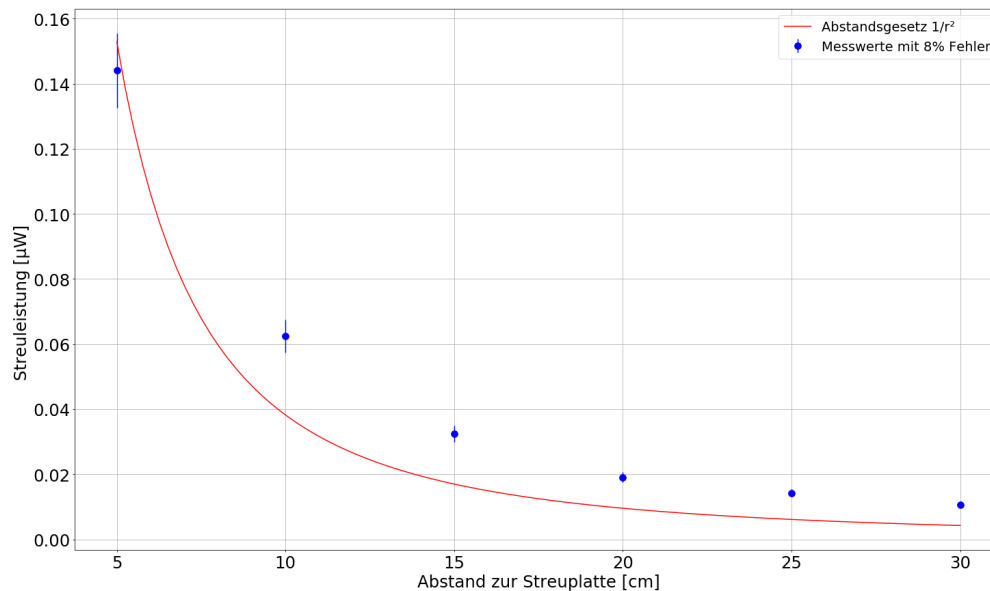


Abbildung 6.11: Abstandsabhängigkeit des neuen Detektionssystems mit PMT

Die getroffene Annahme über die Abstandsabhängigkeit kann somit teilweise bestätigt werden, da sich der Verlauf wie im Abstandsgesetz formuliert verhält. Ein kleinerer Abstand zwischen Streuplate und Detektor war jedoch nicht möglich, da der Tubus sonst selbst den Laserstrahl blockiert hätte. Die rote Kurve zeigt die  $1/r^2$  Abhängigkeit. Der statistische Fehler aus den Kalibrationen beträgt 8%.

## 6.3 Hintergrundmessungen auf der Freistrahlstrecke

### 6.3.1 Umweltsensorik

Auf der Freistrahlstrecke wurde die komplette Sensorik des Systems getestet. Der BME280 liefert dabei z.B. Werte für Luftfeuchtigkeit (Abbildung 6.12) und Temperatur (Abbildung 6.13). Die Messung fand am 27.03.2021 statt.

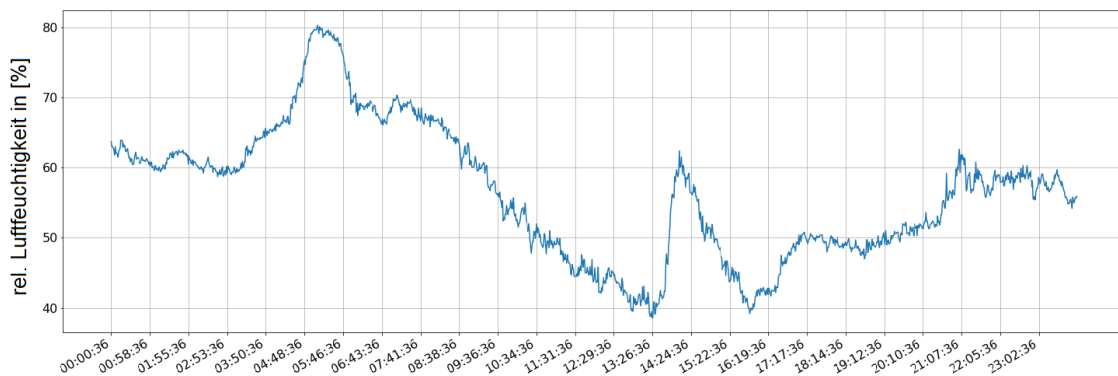


Abbildung 6.12: Luftfeuchtigkeit am 27.03.2021 auf der Freistrahlstrecke in Lampoldshausen

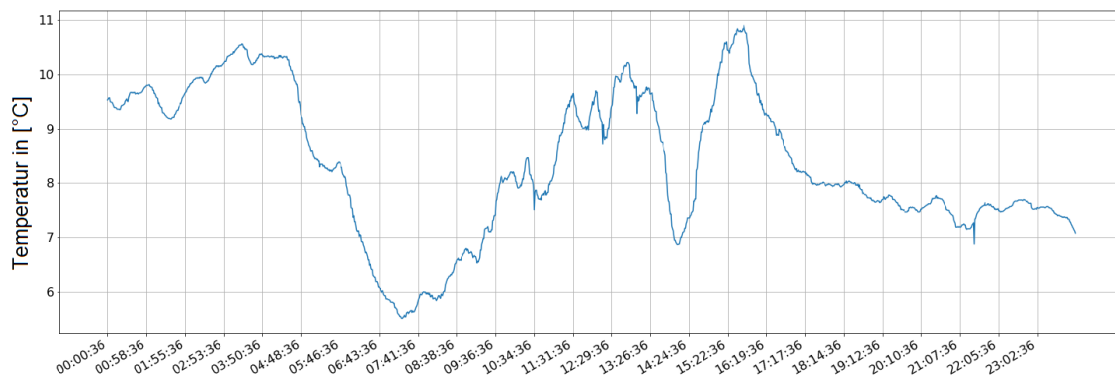


Abbildung 6.13: Temperatur am 27.03.2021 auf der Freistrahlstrecke in Lampoldshausen

Man kann erkennen, dass im Verlauf dieses Tages am Vormittag und Abend die Temperatur abfiel, da es bewölkt war und kurze Schauer gab. Weitere Messungen von anderen Tagen befinden sich im Anhang. Der BME280 kann auch noch Druck und Höhe als Messwerte ausgeben, die im Anhang auch gezeigt werden. Aufgenommen wurde je ein Tagesverlauf, von 0:00 bis 23:59.



Als Vergleich wurde der LNM (Laser Niederschlags Monitor) von der Firma AdolfThies GmbH & Co KG benutzt. Dieser misst die Werte auf 1 m Höhe (Abbildung 6.14).

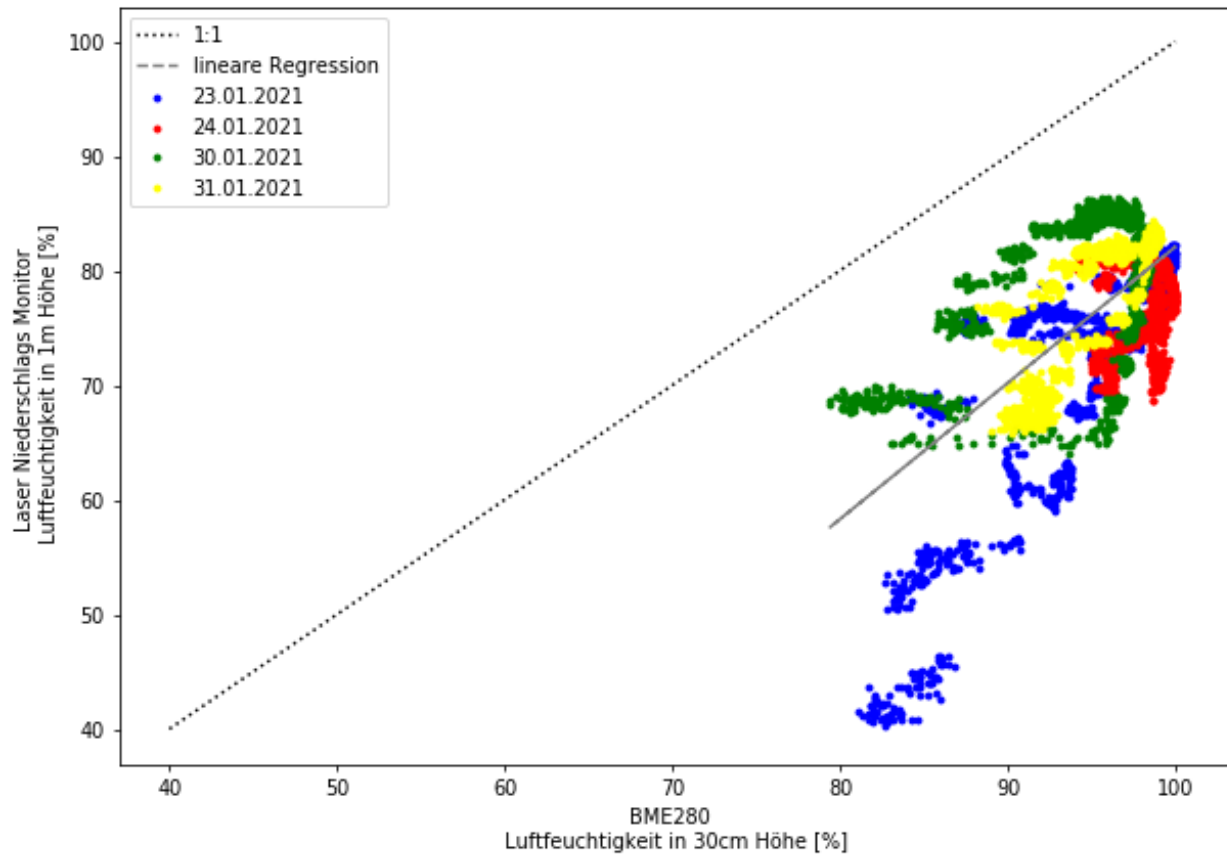


Abbildung 6.14: Vergleich Luftfeuchtigkeitsmesswerte

Beim Vergleich der Luftfeuchtigkeit ergibt sich ein hoher systematischer Versatz. Die Messungen wurden im Januar aufgenommen, wo vermehrt Schnee lag, was eine mögliche Erklärung sein könnte.

Der Vergleich der Lufttemperatur (Abbildung 6.15) brachte etwas bessere Ergebnisse, jedoch ist auch dort eine Abweichung zu sehen. Gründe dafür das Luftfeuchtigkeit und Lufttemperatur so stark abweichen, könnte die Höhe sein, auf der sich die Messgeräte befinden und die unterschiedliche Position der Messgeräte auf der Freistrahlstrecke.

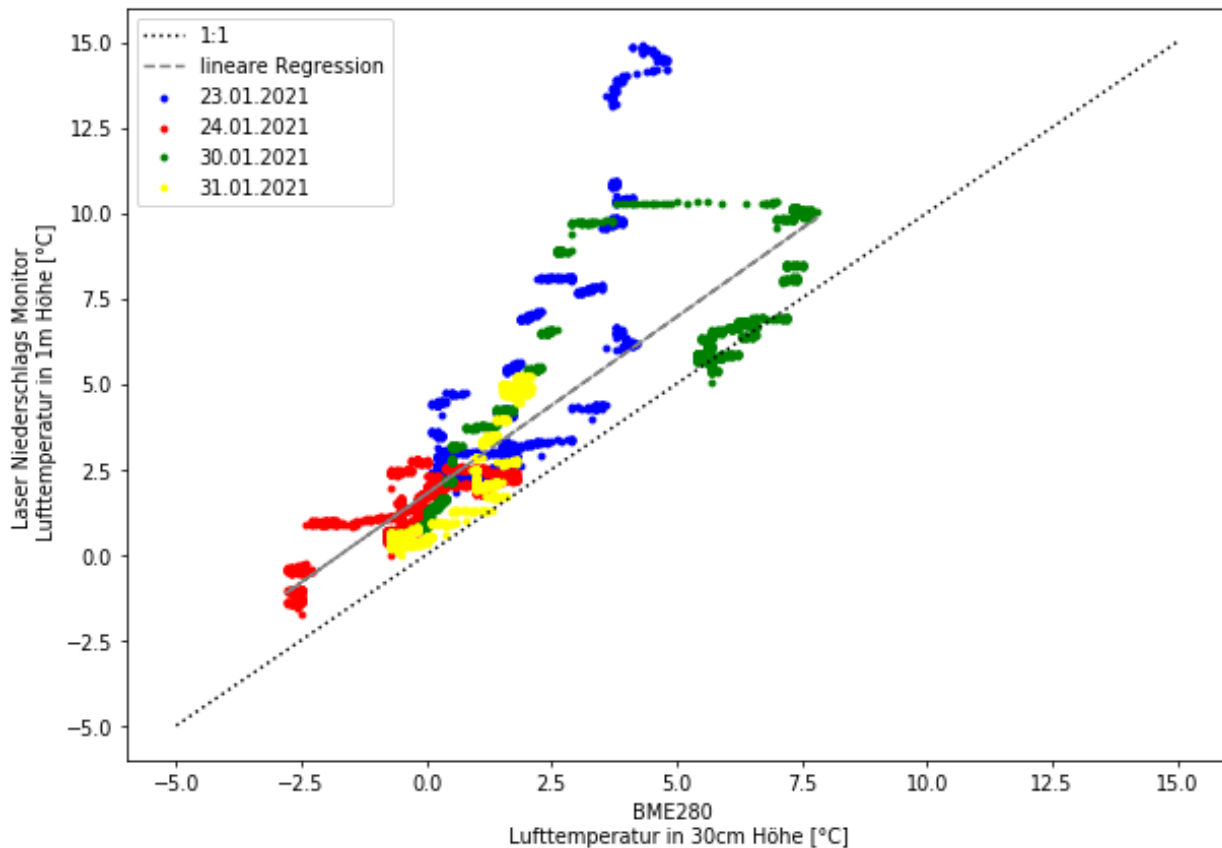


Abbildung 6.15: Temperatur

Leider hat der LNM für weitere Vergleiche an anderen Messtagen gefehlt, da er zu Wartungszwecken abgebaut wurde. Somit kann keine endgültige Aussage getroffen werden über die Genauigkeit des BME280. Um aber einen möglichen Offset bestimmen zu können, braucht es weitere Vergleiche. Diese sollten nachgeholt werden sobald der LNM wieder zur Verfügung steht.

Der Sensirion SPS30 ermittelt die Feinstaubbelastung in der Luft. Dabei werden die Partikelanzahlkonzentration  $N$ , in Anzahl pro  $\text{cm}^3$  (Abbildung 6.16) und Massenkonzentration  $M$  in  $\mu\text{g}$  pro  $\text{m}^3$  (Abbildung 6.17) gemessen, sowie eine durchschnittliche Partikelgröße in  $\mu\text{m}$  (Abbildung 6.18).

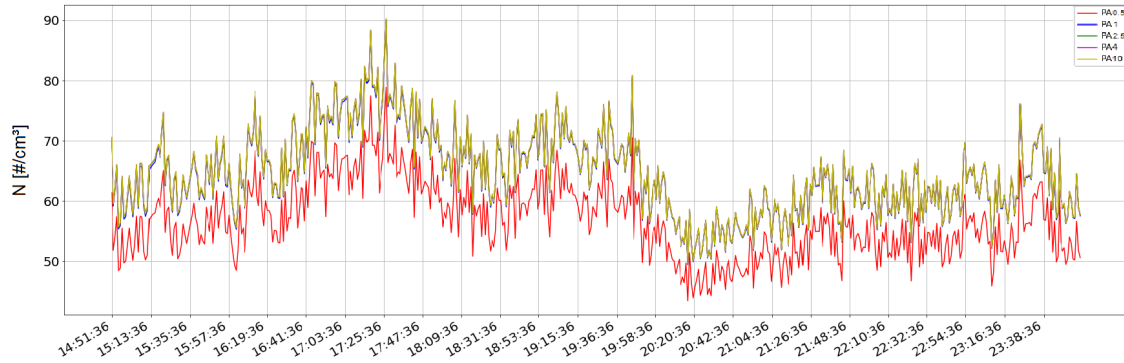


Abbildung 6.16: Partikelanzahlkonzentration in  $\text{Anzahl}/\text{cm}^3$

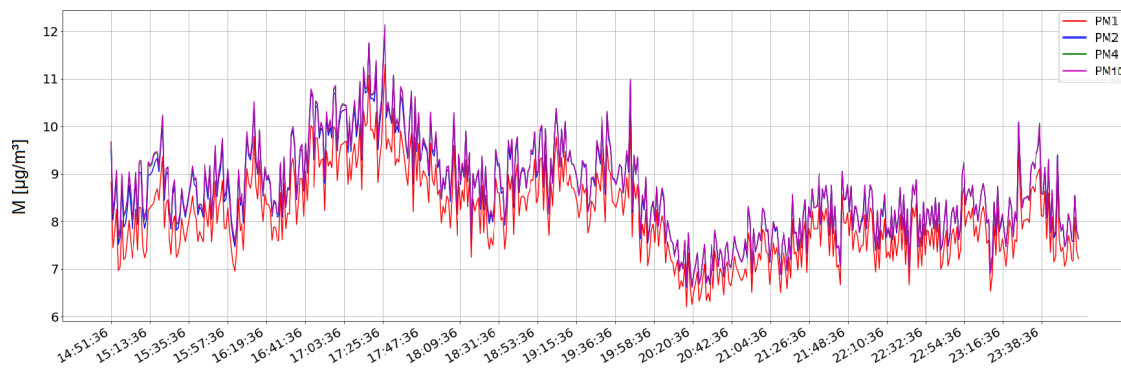


Abbildung 6.17: Massenkonzentration in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$

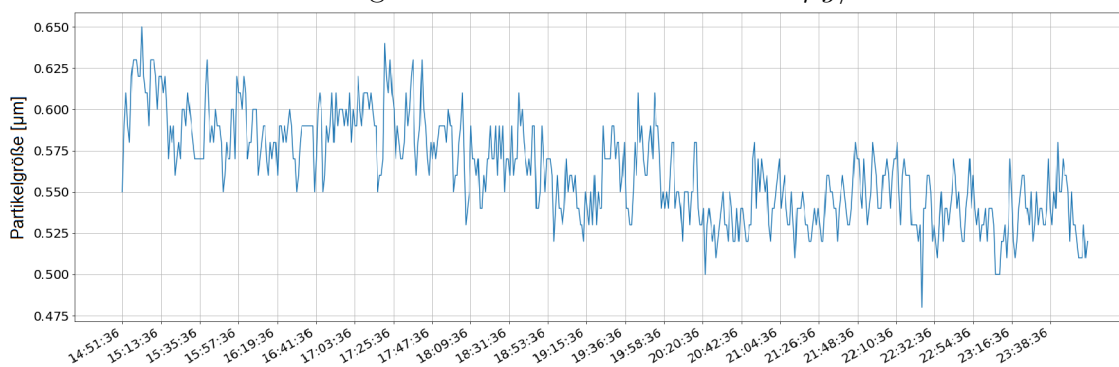


Abbildung 6.18: Durchschnittliche Partikelgröße in  $\mu\text{m}$

Anhand der Daten sieht man, dass die Feinstaubbelastung 17:30 Uhr ein Maximum hatte. Gezeigt wird der 25.03.2021 von 14:30 bis 0:00 Uhr. Weitere Messungen befinden sich im Anhang.

Diese Daten wurden mit dem Fidas 200S Aerosolspektrometer (Abbildung 6.19) auf der Freistrahlstrecke verglichen. Dies ist ein Messgerät, dass dort dauerhaft installiert ist, um die Feinstaubbelastung in der Luft zu messen und von der Firma Palas GmbH hergestellt wurde. Es ergab sich eine gute Übereinstimmung, jedoch mit einigen Ausnahmen. Die Werte zum Beginn einer neuen Messung waren dabei die mit den größten Abweichungen. Gemessen wurde an mehreren Tagen.

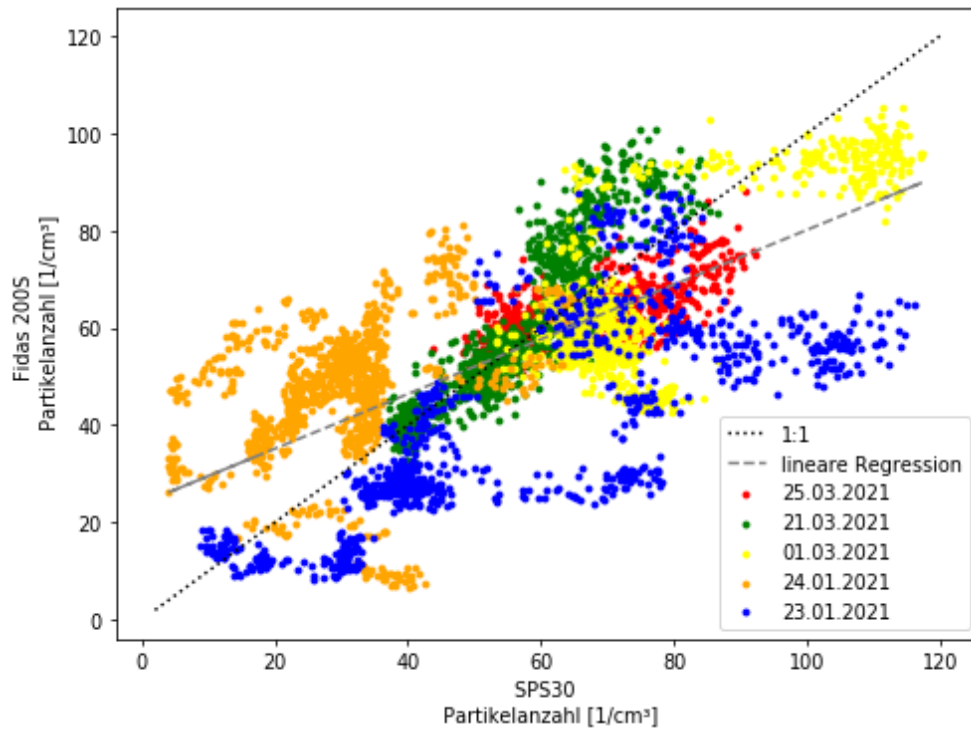


Abbildung 6.19: Vergleich zwischen Palas Fidas 200S und Sensirion SPS30

Die von den GPS-Modulen ermittelten Daten zur Positionsbestimmung werden auf eine Karte (a) übertragen und als Abweichungskarte (b) dargestellt. Es wurden Messungen durchgeführt, die den Unterschied zwischen einem und zwei verwendeten Modulen zeigen (Abbildung 6.21 und 6.20).

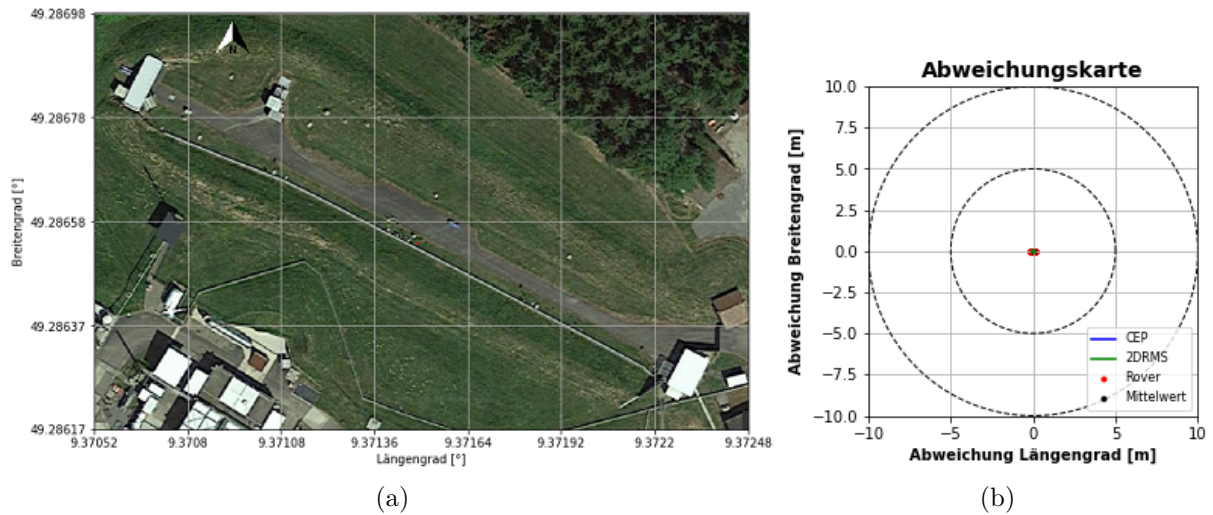


Abbildung 6.20: Zwei GPS-Module mit RTK Fixed Mode

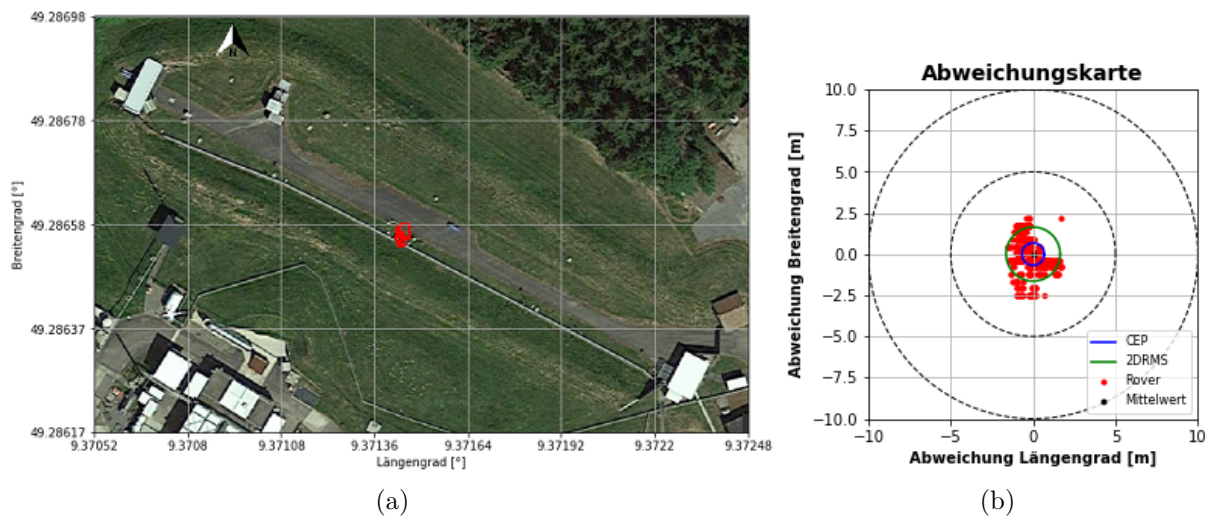


Abbildung 6.21: Ein GPS-Modul ohne RTK Mode



Auch wurde eine Abschattung durch Hindernisse untersucht, indem das System unter einen beweglichen Unterstand mit Metallwänden und Metaldach positioniert wurde (Abbildung 6.22 und 6.23).

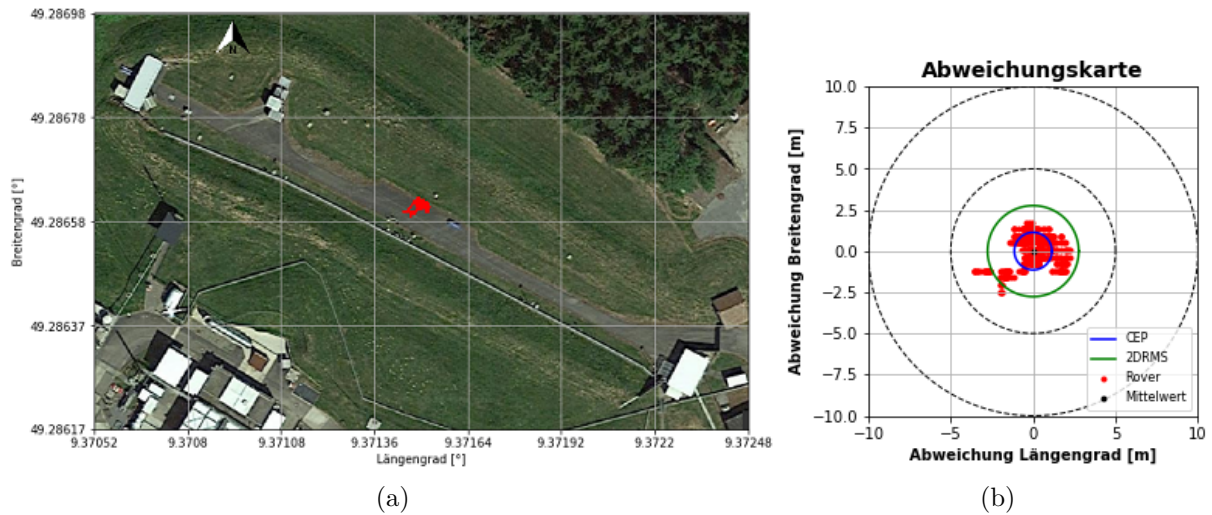


Abbildung 6.22: Zwei GPS-Module mit RTK Float Mode und Abschattung

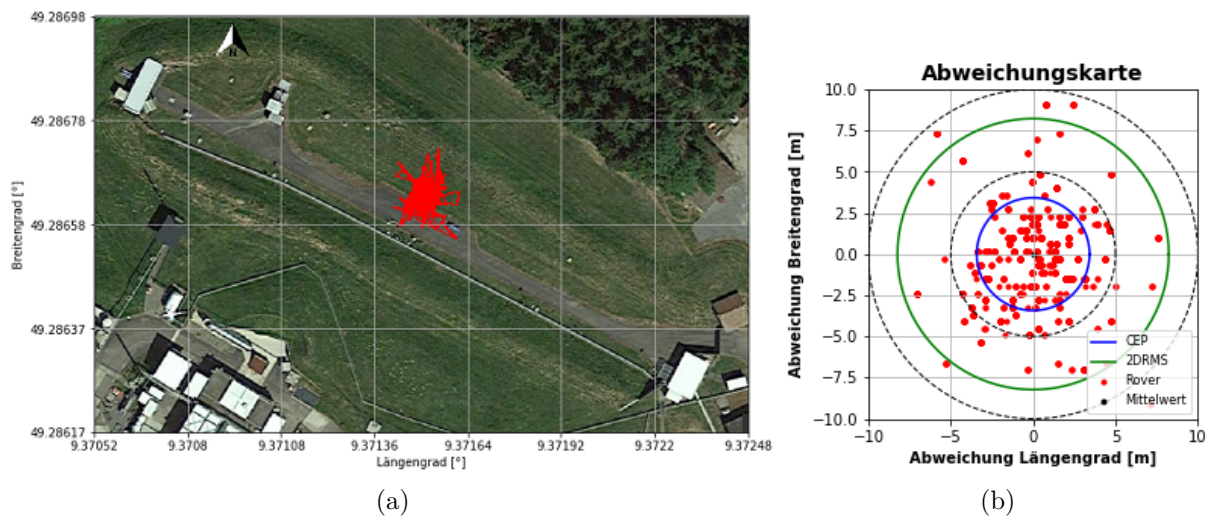


Abbildung 6.23: Ein GPS-Modul ohne RTK Mode und Abschattung

### 6.3.2 Detektionssystem

Während die Funktion der Sensoren zur Wetter- und Positionsbestimmung auf der Freistrahlstrecke getestet wurden, waren auch Messungen mit den Detektoren möglich. Die dabei gemessene Hintergrundstrahlung variierte je nach Ausrichtung des Detektors. Wenn die Sonnenstrahlen direkt in den Detektor fielen, wurde ein Maximum beobachtet. Bei dem ersten Versuch dieser Art wurde das vorhandene System mit PMT benutzt (Abbildung 6.24). Im Tubus war ein Langpassfilter von Thorlabs mit 980 nm und ein Bandpassfilter von Semrock mit 1030 nm. Es war ein sehr sonniger Tag und der Detektor war nach Süden ausgerichtet. Zur Mittagszeit wurde das Maximum detektiert, das jedoch so stark war, dass der Lock-in-Verstärker in die Sättigung überging. Der Lock-in-Verstärker war auf Sensitivität 3 eingestellt und das Hochspannungsnetzteil auf -800 V. Zu Zeiten geringer Sonnenstrahlung wurde nahezu keine Spannung gemessen. Die Umrechnung in eine Leistung soll eine Vergleichbarkeit zu den anderen Detektoren ermöglichen.

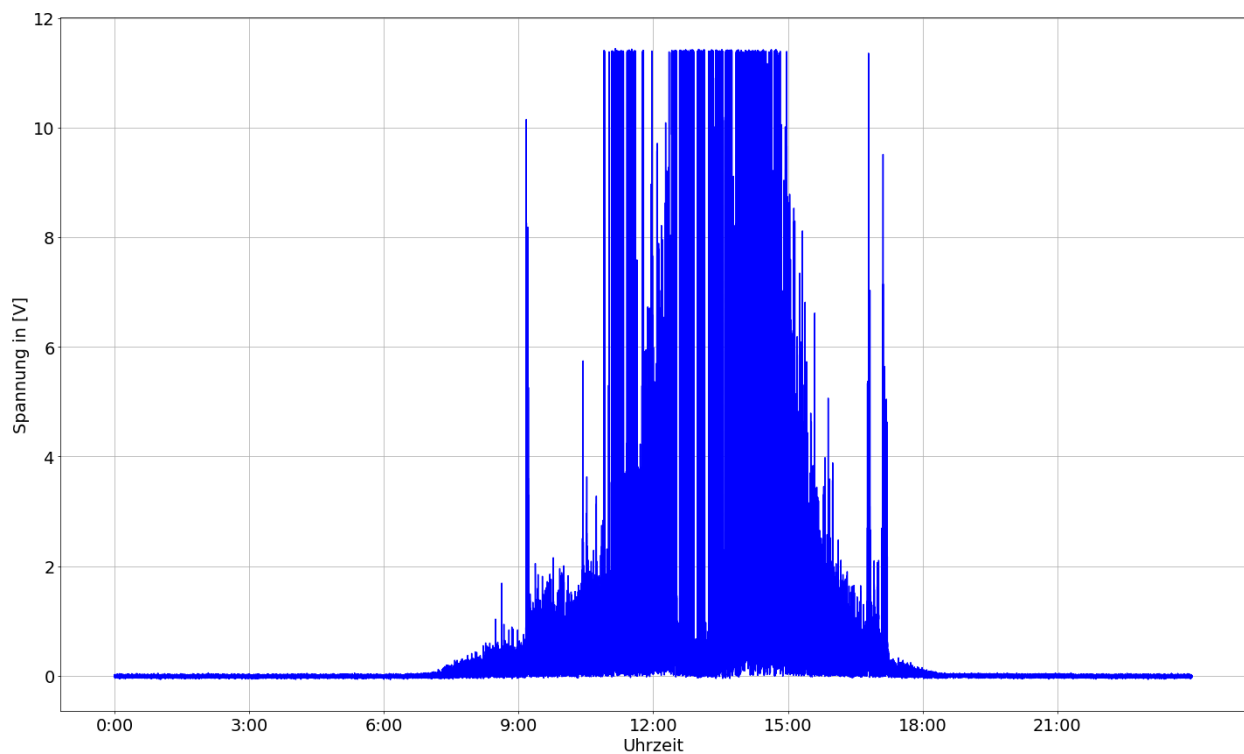


Abbildung 6.24: Hintergrundmessung mit vorhandenem Detektionssystem und PMT am 27.02.2021

Die Umrechnung in eine Leistung war nicht möglich da keine Kalibrierung bei 0 Hz erfolgte.

Das neue Detektionssystem mit PMT wurde auf die gleiche Weise betrieben wie beim ersten Versuch mit dem vorhandenen System. Nur die Sensitivität am Lock-in-Verstärker wurde verringert auf Stufe 1 und die Hochspannungsversorgung auf -800 V. Im Tubus war ein Langpassfilter von Thorlabs mit 980 nm und ein Bandpassfilter von Semrock mit 1030 nm. An diesem Tag war es bewölkt mit leichten Auflockerungen zwischen 10 und 12 Uhr. Dies ist auch gut in Abbildung 6.25 zu sehen. Die angepassten Einstellungen am Lock-in-Verstärker und an der Hochspannungsversorgung verhinderten auch ein Übersättigen des Lock-in-Verstärkers.

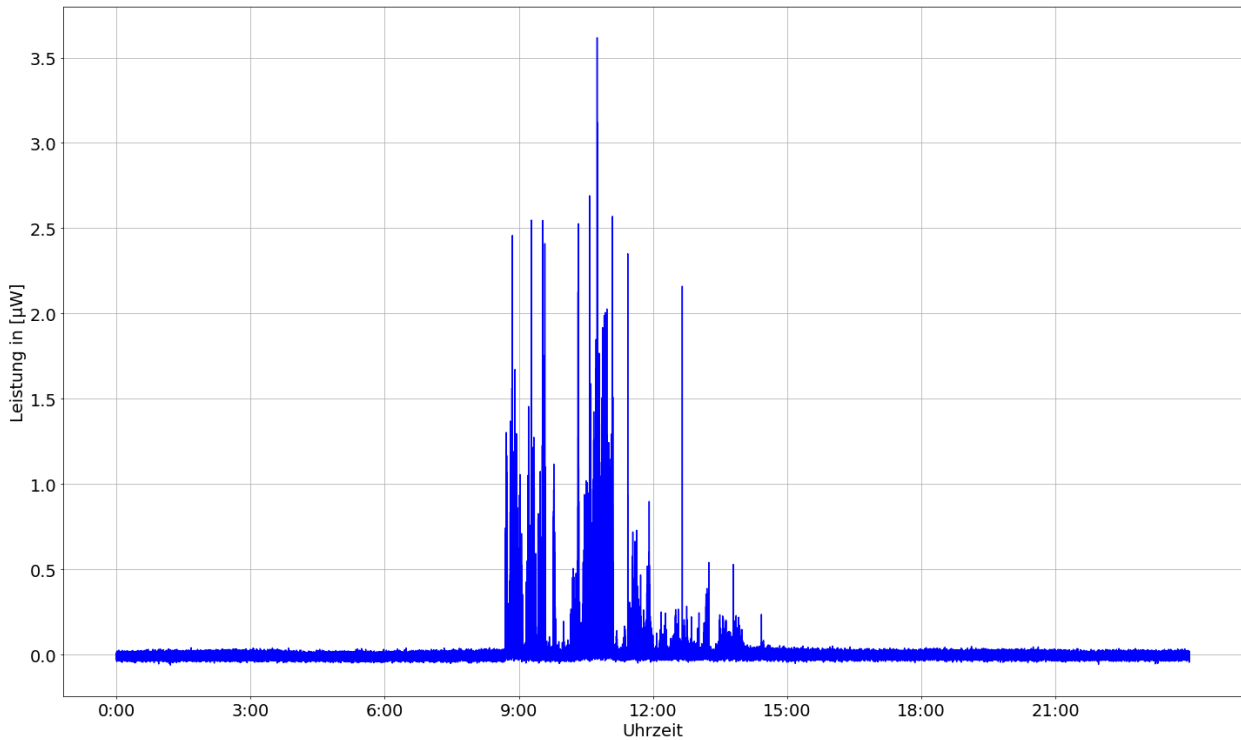


Abbildung 6.25: Hintergrundmessung mit neuem Detektionssystem und PMT am 20.03.2021

Der verwendete Faktor für eine Berechnung in eine Leistung war bei Sensitivität 1,  $P/U = 6,72 \cdot 10^{-7} \frac{W}{V}$ .



Als Abschluss der Messungen auf der Freistrahlstrecke wurde auch der PDA noch getestet (Abbildung 6.26). Der Tag war wieder sonnig mit leichter Bewölkung. Der PDA wurde mit einer Verstärkung von 40 dB betrieben und am Lock-in-Verstärker war die Sensitivität 2 eingestellt. Im Tubus war ein Langpassfilter von Thorlabs mit 980 nm und ein Bandpassfilter von Semrock mit 1030 nm. Da mit Sensitivität 2 keine Kalibration bei 0 Hz durchgeführt wurde, konnte auch keine Leistungsberechnung erfolgen. Am Abend gab es Ausschläge in der gemessenen Hintergrundstrahlung, die nicht eindeutig erklärt werden können.

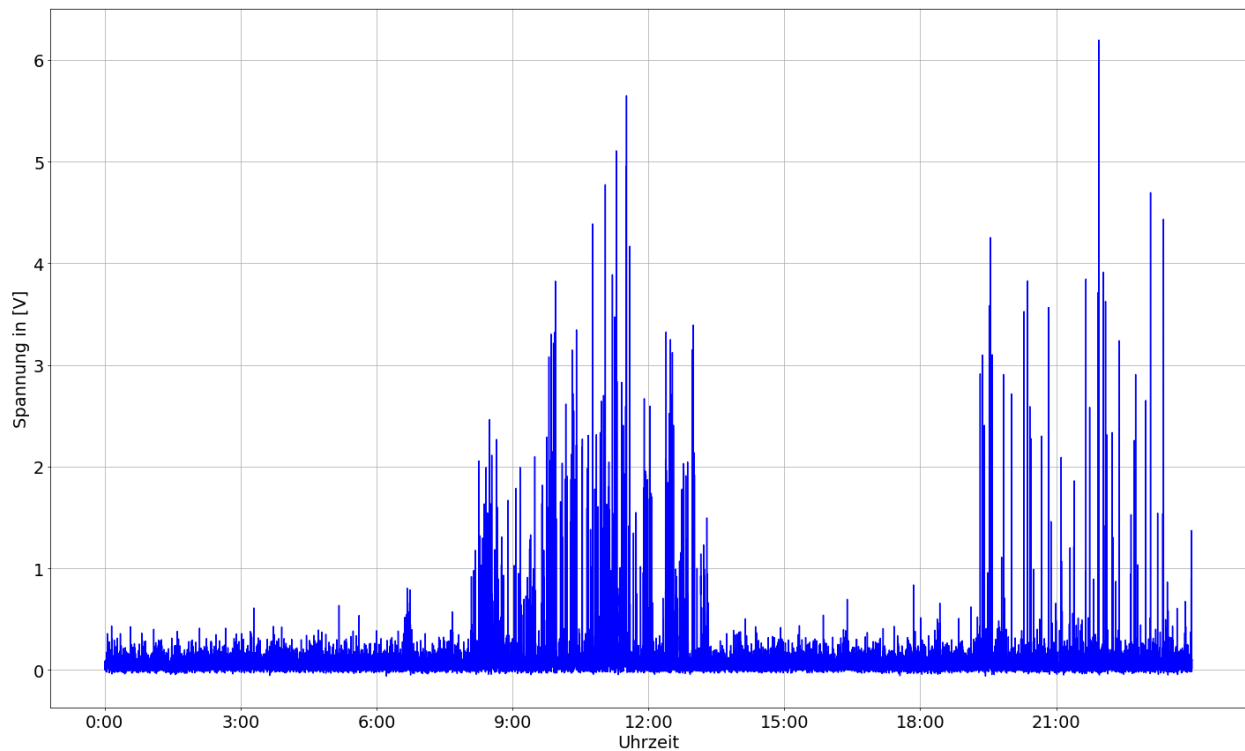


Abbildung 6.26: Hintergrundmessung mit neuem Detektionssystem und PDA am 27.03.2021

## 7 Fazit und Ausblick

### 7.1 Zusammenfassende Bewertung

In dieser Arbeit wurde ein Detektionsgerät entwickelt, das die Gefährdungsbeurteilung durch Streuleistungen bestimmen kann. Dabei wurde das menschliche Auge für eine Empfangsoptik nachempfunden.

Die Zusammenstellung des Systems brachte einige Herausforderungen mit sich, wie die zeitgleiche Kommunikation der einzelnen Komponenten mit der Hauptrecheneinheit. Der Arduino (1 Hz) und der Red Pitaya (bis 500 Hz) haben z. B. unterschiedliche Übertragungsraten, was ein gleichzeitiges Abfragen erschwerte, gelöst werden konnte das ganze durch Schleifenoptimierung in Python. Auch „Threading“ wäre hier möglich und sollte bei zukünftigen Erweiterungen erwogen werden.

Durch Vergleichsmessungen mit vorhandenen, meist teureren Messgeräten, wurde die Datenerfassung der Umweltsensoren validiert. Durch weitere Vergleichsmessungen kann die Datenerfassung verbessert werden, indem der Offsetwert der Sensoren abgestimmt wird. Die mit den Sensoren ermittelten Daten erlauben Rückschlüsse auf die Bedingungen zur Zeit der Messung und durch die Positionsbestimmung ist genau bekannt wo sich das Detektionsgerät während der Messung befand. Dadurch lässt sich die Gefährdungslage jederzeit neu bewerten. Das System kann sehr leicht an die geforderten Bedingungen angepasst werden. Durch das schnell auswechselbare Filtersystem ist es möglich, sich an jede Laserquelle (Wellenlänge) anzupassen. Das Verwenden unterschiedlicher Detektoren erweitert das Einsatzgebiet nochmals.

Das Kalibrieren der Detektoren stellte einen wichtigen Schritt dar, um mit dem System arbeiten zu können. Nur bei den Einstellungen, mit denen das System kalibriert wurde, kann auch eine Leistungsberechnung und daraus eine Berechnung des BRDF erfolgen. Während der Kalibration mit einer Ulbrichtkugel gab es starke Abweichungen im gemessenen Fotostrom, der direkt in der Kugel gemessen wurde. Obwohl es keine Veränderung der Konfiguration im Laserarm gab, wurden hier unterschiedliche Photoströme gemessen. Zu sehen ist dies in der Kalibration des vorhandenen und neuen Systems. Die Kalibration wurde an zwei aufeinander folgenden Tagen durchgeführt. Der Photostrom ist um ca. Faktor zwei erhöht, sollte aber eigentlich gleich sein, da sich im Laserarm nichts geändert hat.

Ergebnisse aus den Streulichtexperimenten zeigen, dass das Detektionssystem reproduzierbare Daten liefern kann, aber nur wenn der Aufbau eine geringe Justierempfindlichkeit besitzt. Eine Veränderung der Sensitivität führte zu teilweise anderen Messkurven, was die Auswertung erschwerte. Die Spannungsmessung mit dem Red Pitaya am Lock-in-Verstärker wies zu dem Schwankungen auf, die sich nicht minimieren ließen. Dies zeigte sich besonders bei Experimenten, die an mehreren Tagen durchgeführt wurden. Die Schwankungen bei Verwendung des PDA waren dabei am größten.

Es zeigte sich, dass bei einer Kalibration mit einer höheren Frequenz die Schwankung der Werte abnahm und die Ergebnisse dadurch auch reproduzierbarer waren. Daher sollte eine erneute Kalibration bei einem höheren Referenzsignal erfolgen. Auch die Wahl des Optischen Chopper hatte messbare Auswirkungen. Messungen mit einem Chopper Rad mit 2 Blättern lieferten bessere Er-

gebnisse als bei einem Chopper Rad mit 10 Blättern, obwohl beide ein 50 % Tastverhältnis hatten und mit gleicher Frequenz arbeiteten.

Bei den Streulichtexperimenten zeigte sich außerdem, dass ein präziser Aufbau des Experiments darüber entscheidet, wie verwertbar die Ergebnisse sind. Ein geübter Experimentator ist daher unabdingbar, um das System zu charakterisieren. Die Messungen auf der Freistrahlstrecke, die dem geplanten Einsatzzweck nahe kommen, sind leichter zu realisieren und sollten für unterwiesenes Personal kein Problem darstellen.

## 7.2 Ausblick

Der fertiggestellte und einsatzfähige Prototyp des Detektionssystems lässt sich noch durch im Folgenden aufgeführte Optimierungen und Erweiterungen verbessern. Ziel soll dabei immer sein, das System flexibler und unabhängiger einsetzbar zu machen.

Um eine leichtere Handhabung und Bedienung zu ermöglichen, soll das System mit einem kabellosen Monitor aufgerüstet werden. Dieser wird über das Wifi des Messrechners angesprochen und soll sowohl das Erfassen als auch das Auswerten der Messungen möglich machen. Auch eine Grafische Benutzeroberfläche (GUI) soll darauf zu sehen sein. Damit ist das System für unterwiesenes Personal leicht bedienbar und so noch flexibler einsetzbar, ohne die Notwendigkeit einer Netzwerkverbindung. Die GUI soll in Python mit PyQt oder Tkinter realisiert werden und die Gefährdungskarte, die Strahlungsleistung und weitere Daten anzeigen können.

Bei den Messungen auf der Freistrahlstrecke ist es öfter, durch minimale Schwankungen des Versorgungsnetzes, zu Ausfällen des Messrechners gekommen. Daher soll eine unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) mit in der Rollbox untergebracht werden. Am meisten profitieren würde das System von einer Online-USV. Der Vorteil besteht darin, dass unabhängig von den örtlichen Gegebenheiten, Messungen durchgeführt werden können. So etwa bei Schwankungen oder Unterbrechungen im Versorgungsnetz oder beim Einsatz in Gebieten mit einer anderen Versorgungsspannung oder -frequenz. Die USV besteht dabei aus einem Gleichrichter, einer Batterie und einem Wechselrichter, an dem das Detektionssystem direkt angeschlossen werden kann.

Eine weitere Verbesserung wäre die Mobile Box, in der sich die Messelektronik befindet, auszutauschen. Durch Anschaffung eines Transportwagens, der sich leichter bewegen lässt und mehr Platz bietet, würde sich die Handhabung und Leistungsfähigkeit verbessern. Das Fortbewegen, vor allem bei unbefestigtem Grund, wäre so leichter möglich. Durch den gewonnenen Platz wären auch weitere Erweiterungen kein Problem.

Eine Temperaturmessung im Tubus und im Wetterschutzgehäuse ist bereits geplant und die Komponenten dafür bestellt. Dies soll der Temperaturüberwachung dienen, um die Bedingungen während der Datenerfassung aufzuzeichnen.

# Literaturverzeichnis

- [Ard] Arduino. *Arduino Mega 2560 Datenblatt*. Zugriff am 04.11.2020. URL: <https://docs.rs-online.com/9ab3/0900766b80e8ba22.pdf>.
- [Aus] ABS Ausschuss für Betriebssicherheit. *TROS Laserstrahlung Teil Allgemeine*. Zugriff am 03.04.2021. URL: <https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/TROS/TROS.html>.
- [Bos] Bosch. *BME280 Datenblatt*. Zugriff am 04.11.2020. URL: <https://docs.rs-online.com/a2ff/0900766b81647b32.pdf>.
- [CET97] D.A. Corder, D.R. Evans, and J.R. Tyrer. "An improved maximum permissible exposure meter for safety assessments of laser radiation". In: *Optics and Lasers in Engineering* 28.6 (1997), pp. 423–442. ISSN: 0143-8166. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143816697000559>.
- [Cor+97] D.A. Corder et al. "High power laser beam delivery monitoring for laser safety". In: *Optics and Lasers in Engineering* 27.5 (1997), pp. 479–492. ISSN: 0143-8166. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143816696000498>.
- [Dan] DangerousDoug. *Raspberry Pi HQ camera case*. <https://www.thingiverse.com/thing:4338679>. Zugriff am 18.01.2021.
- [DP05] Raju U. Datla and Albert C. Parr. "1. Introduction to Optical Radiometry". In: *Optical Radiometry*. Ed. by Albert C. Parr, Raju U. Datla, and James L. Gardner. Vol. 41. Experimental Methods in the Physical Sciences. Academic Press, 2005, pp. 1–34. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1079404205410012>.
- [ETE20] BG ETEM. *Lasersicherheit PU025*. BG ETEM, Nov. 2020. URL: <https://medien.bgetem.de/medienportal/artikel/UFUwMjU->.
- [FEM] FEMTO. *LIA-MVD-200-L Datenblatt*. Zugriff am 04.11.2020. URL: <https://www.femto.de/images/pdf-dokumente/de-lia-mvd-200-l.pdf>.
- [Ger] T. A. Germer. *pySCATMECH: a Python interface to the SCATMECH library of scattering codes, 2020, Proc. of SPIE Vol. 11485*.
- [Gig] Gigahertz-Optik. *1.4 Grundlegende radiometrische Größen*. <https://www.gigahertz-optik.com/de-de/service-und-support/informationsportal/grundlagen-lichtmesstechnik/licht-farbe/radiom-groessen/>. Zugriff am 10.04.2021.

- [Ham07] Hamamatsu. *Photomultiplier Tubus Basics and Applications Third Edition (3a)*. Handbuch PMT. 2007. URL: [https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/PMT\\_handbook\\_v3aE.pdf](https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/PMT_handbook_v3aE.pdf).
- [Jac] Dave Jacobsen. *An Introduction to Scattering and the Surface Property in TracePro*. [https://www.lambdaresearch.com/wp-content/uploads/support/tracepro/tracepro\\_webinars/December2010Webinar.pdf](https://www.lambdaresearch.com/wp-content/uploads/support/tracepro/tracepro_webinars/December2010Webinar.pdf). Zugriff am 07.05.2021.
- [MA] Alexander Mordvintsev and K. Abid. *OpenCV Python Tutorial*. <https://opencv-python-tutroals.readthedocs.io/en/latest/index.html>. Zugriff am 20.01.2021.
- [mie] mieplot. *Mieplot*. <http://www.philiplaven.com/mieplot.htm>. Zugriff am 20.02.2017.
- [Mis13] Michael I. Mishchenko. “Measurement of electromagnetic energy flow through a sparse particulate medium: A perspective”. In: *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* 123 (2013). Peter C. Waterman and his scientific legacy, pp. 122–134. ISSN: 0022-4073. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022407313000149>.
- [Mis15] Michael I. Mishchenko. “Measurement and modeling of electromagnetic scattering by particles and particle groups”. In: *Polarimetry of Stars and Planetary Systems*. Ed. by Ludmilla Kolokolova, James Hough, and Anny-Chantal Editors Levasseur-Regourd. Cambridge University Press, 2015, pp. 13–34.
- [MIT] MIT-OpenCourseWare. *Types of Reflection*. <https://www.flickr.com/photos/mitopencourseware/4815499473>. Zugriff am 01.05.2021.
- [Neu] Neuhaus. *pyrpl*. <https://github.com/lneuhaus/pyrpl>. Zugriff am 09.12.2020.
- [Nor15] Deutschen Instituts für Normung. *Sicherheit von Lasereinrichtungen - Teil 1*. DIN60825-1. July 2015.
- [Oph] Ophir Optronics LTD. *Online Shop*. <https://www.ophiropt.com/de/homepage>. Zugriff am 10.02.2021.
- [Par18] C. Pargmann. *Kalibrierung von optischen Detektionssystemen mit einer Ulbricht-Kugel am Beispiel einer winkelabhängigen Streulichtmessung*. Tech. rep. 1. DLR Lampoldshausen, 2018.
- [Pec+21] Andreas Peckhaus et al. “Development of a radiometric sensor for the hazard assessment of scattered high-power laser radiation”. in Proc. SPIE. 2021.
- [Pit] Red Pitaya. *Red Pitaya STEMLab 125*. Zugriff am 04.11.2020. URL: <https://docs.rs-online.com/8714/0900766b815776bc.pdf>.
- [Sch+07] J. Schelle-Kreis et al. *Atmosphärische Aerosole: Quellen, Vorkommen, Zusammensetzung*. Chemie in unserer Zeit, 2007, 41, S. 220-230, 2007.

- 
- [Sen] Sensirion. *Sensirion SPS30 Datenblatt*. Zugriff am 04.11.2020. URL: [https://www.sensirion.com/fileadmin/user\\_upload/customers/sensirion/Dokumente/9.6\\_Part particulate\\_Matter/Datasheets/Sensirion\\_PM\\_Sensors\\_Datasheet\\_SPS30.pdf](https://www.sensirion.com/fileadmin/user_upload/customers/sensirion/Dokumente/9.6_Part particulate_Matter/Datasheets/Sensirion_PM_Sensors_Datasheet_SPS30.pdf).
- [Spe] Spektrum. *Lambert-Strahler*. <https://www.spektrum.de/lexikon/optik/lambert-strahler/1715>. Zugriff 05.05.2021.
- [Sph] Sphere Optics GmbH. *Online Shop*. <https://sphereoptics.de/>. Zugriff am 10.02.2021.
- [Sto12] John C. Stover. *Optical Scattering: Measurement and Analysis, Third Edition*. Spie Press Book, 2012. ISBN: 9781628418408.
- [Tho] Thorlabs, Inc. *Online Shop*. <https://www.thorlabs.com/>. Zugriff am 10.02.2021.
- [Tho17] Thorlabs. *PDA100A2 Si Switchable Gain Detector User Guide*. Rev A. TTN1134694-D02. Dec. 2017. URL: <https://www.thorlabs.com/drawings/4859fab84f759f28-8D0C955D-97BE-EF92-F7D1598065B867CD/PDA100A2-Manual.pdf>.
- [TMW14] Paul A. Tipler, Gene Mosca, and Jenny Wagner. *Physik für Wissenschaftler und Ingenieure*. Seventh edition. Springer Spektrum, Feb. 2014. ISBN: 978-3-642-54165-0.
- [u-b] u-blox. *C94-M8P User Guide*. Zugriff am 04.11.2020. URL: [https://www.u-blox.com/sites/default/files/C94-M8P-AppBoard\\_UserGuide\\_\(UBX-15031066\).pdf](https://www.u-blox.com/sites/default/files/C94-M8P-AppBoard_UserGuide_(UBX-15031066).pdf).
- [Uni] Maryville University. *Detectors*. <https://blogs.maryville.edu/aas/detection/>. Zugriff am 02.05.2021.
- [Van] Vanitha. *Specular Reflection vs. Diffuse Reflection*. <http://physics-knowledge.blogspot.com/2010/05/specular-raflection-vs-diffuse.html>. Zugriff am 10.04.2021.

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Regelwerk zur Lasersicherheit Quelle: [ETE20]	9
2.2	Das elektromagnetische Spektrum Quelle: [TMW14]	11
2.3	Raumwinkel eines Beobachters vom Punkt P Quelle: [Gig]	12
2.4	Strahlungsfluss einer Lichtquelle Quelle: [Gig]	13
2.5	Typische Richtungsverteilung einer Lichtquelle Quelle: [Gig]	13
2.6	Bestrahlungsstärke: Strahlenfluss pro Oberfläche Quelle: [Gig]	14
2.7	Bestimmung der BRDF Quelle: [Jac]	15
2.8	Funktionsweise on-side PMT Quelle: [Uni]	16
2.9	Schaltbild PDA 100A2 von Thorlabs Quelle: [Tho17]	17
2.10	Beispielhafte Darstellung der Streuung an einem atmosphärischen Partikel Quelle: [mie]	18
2.11	Arten der Reflexion von Oberflächen Quelle: [MIT]	19
3.1	Aufbau auf der Freistrahlstrecke	20
3.2	Elektronik Schaltung Quelle [Pec+21]	21
3.3	Arduino Mega 2560 Quelle: [Ard]	22
3.4	Grove - Barometer Sensor Quelle: [Bos]	22
3.5	ublox C94-M8P Quelle: [u-b]	23
3.6	Sensirion Feinstaubsensor Quelle: [Sen]	23
3.7	Blockschaltbild Lock-in-Verstärker Quelle: [FEM]	24
3.8	Red Pitaya Quelle: [Pit]	25
3.9	PI Zero HQ Camera mit Teleobjektiv Quelle: [Dan]	26
3.10	Pi Kamera mit Weitwinkelobjektiv (links) und Teleobjektiv (rechts)	26
3.11	3D Ansicht des Tubus mit PMT und PDA Quelle: [Pec+21]	27
3.12	Optischer Aufbau des Systems Quelle: [Pec+21]	27
3.13	Tubus mit optischen System	28
3.14	Neues Wetterschutzgehäuse Quelle [Pec+21]	28
3.15	Elektronikbox mit Komponenten	29
3.16	Rollbox Front- und Rückansicht mit Sensor-Gehäuse	29
3.17	Streulichtaufbau mit Schienensystem	30
3.18	Streulichtaufbau in der Bearbeitungsbox	30
4.1	Kalibration des Red Pitaya mit Labornetzteil und -oszilliskop	32
4.2	Aufbau mit Ulbrichtkugel Quelle: [Pec+21]	33
4.3	Experimenteller Aufbau in der Bearbeitungsbox. Links: Laserarm, Rechts: Detektorarm	33
4.4	Kalibration des vorhandenen Systems mit PMT	34
4.5	Kalibration des neuen Systems mit PMT	35
4.6	Kalibration des neuen Systems mit PDA	36

5.1	Probenmaterial für Streulichtexperimente . . . . .	37
5.2	Einfacher Streulichtaufbau auf Breadboard . . . . .	38
5.3	Aufbau in der Bearbeitungsbox mit PDA . . . . .	39
5.4	Aufbau des TROS-Sensors auf der Freistrahlstrecke . . . . .	41
6.1	Winkelabhängigkeit des vorhandenen Systems . . . . .	42
6.2	Abstandsabhängigkeit des vorhandenen Systems . . . . .	43
6.3	Winkelabhängigkeit des vorhandenen Detektionssystems mit PMT . . . . .	44
6.4	BRDF bei Winkelabhängigkeit mit vorhandenem Detektionssystem . . . . .	45
6.5	Winkelabhängigkeit des neuen Detektionssystems mit PMT . . . . .	46
6.6	Winkelabhängigkeit des neuen Detektionssystems mit PMT . . . . .	46
6.7	BRDF bei Winkelabhängigkeit mit neuen Detektionssystem mit PMT . . . . .	47
6.8	Winkelabhängigkeit des neuen Detektionssystems mit PDA . . . . .	48
6.9	Winkelabhängigkeit bei Aluminium mit 30° Einfallswinkel . . . . .	49
6.10	Winkelabhängigkeit bei Aluminium mit 40° Einfallswinkel . . . . .	51
6.11	Abstandsabhängigkeit des neuen Detektionssystems mit PMT . . . . .	52
6.12	Luftfeuchtigkeit am 27.03.2021 auf der Freistrahlstrecke in Lampoldshausen . . . . .	53
6.13	Temperatur am 27.03.2021 auf der Freistrahlstrecke in Lampoldshausen . . . . .	53
6.14	Vergleich Luftfeuchtigkeitsmesswerte . . . . .	54
6.15	Temperatur . . . . .	55
6.16	Partikelanzahlkonzentration in $Anzahl/cm^3$ . . . . .	56
6.17	Massenkonzentration in $\mu g/m^3$ . . . . .	56
6.18	Durchschnittliche Partikelgröße in $\mu m$ . . . . .	56
6.19	Vergleich zwischen Palas Fidas 200S und Sensirion SPS30 . . . . .	57
6.20	Zwei GPS-Module mit RTK Fixed Mode . . . . .	58
6.21	Ein GPS-Modul ohne RTK Mode . . . . .	58
6.22	Zwei GPS-Module mit RTK Float Mode und Abschattung . . . . .	59
6.23	Ein GPS-Modul ohne RTK Mode und Abschattung . . . . .	59
6.24	Hintergrundmessung mit vorhandenem Detektionssystem und PMT am 27.02.2021 . . . . .	60
6.25	Hintergrundmessung mit neuem Detektionssystem und PMT am 20.03.2021 . . . . .	61
6.26	Hintergrundmessung mit neuem Detektionssystem und PDA am 27.03.2021 . . . . .	62



# Tabellenverzeichnis

4.1	Vergleich des Red Pitaya mit dem Labor Oszilloskop . . . . .	32
4.2	Kalibrierung vorhandenes System mit PMT . . . . .	34
4.3	Kalibrierung neues System mit PMT . . . . .	35
4.4	Kalibrierung neues System mit PDA . . . . .	36

# A1 - Python Programm

## Hauptprogramm

```
1  # -*- coding: utf-8 -*-
2  """
3  Created on Thu Feb 18 10:47:58 2021
4
5  @author: kuhn_pr
6  """
7
8  import datetime
9  import time
10 import Arduino_auslesen as ardu
11 import red_pitaya as pita
12 #import Pi_Kamera as cam
13
14 zeitstempel = datetime.datetime.now().strftime("%Y-%m-%d %H.%M ")
15
16 t = 338400 # Wie lange Daten holen [s]
17 t2 = 60 # Wie oft Daten vom Arduino holen, alle
18 [s]
19 t3 = 0.005 # Wie oft Daten vom RedPitaya holen,
20 alle [s]
21 point = 10 # Jeder x-te Wert für RedPitaya-Plot
22 # fix_lat = 49.2868
23 # fix_lon = 9.3715
24
25 count = 0
26 file_name_a = ardu.file(zeitstempel) # Erstelle File
27 file_name_b = pita.file(zeitstempel) # Erstelle File
28 #header = 'SampleName: Aluminium rau, Einfallswinkel: 40°, EinfallAzimuth: 0°,
29 \nStreuwinkel: 10°, StreuAzimuth: 0°, Zentrum der Streuplatte, 1030nm,
30 unpolarisiert, \nAbstand Platte-TROS: 20cm, neuer TROS, Ausgangsleistung (Pi) Laser:
31 ...mW \n'
32 data = None
33
34 # Initialisierung
35 ser = ardu.ini()
36 file = pita.ini(file_name_b) #, header)
37
38 end_time = time.time() + t
39 intervall_ardu = time.time() + t2
40 intervall_pita = time.time() + t3
41
42 # Schleife für Daten holen
43 while time.time() < end_time:
44     # Arduino
45     data = ardu.function(data, ser) # Hole Daten vom Arduino
46     if time.time() >= intervall_ardu:
47         #print('write Data...')
48         ardu.writefunction(data, file_name_a) # Schreibe Daten von Arduino in
49         File, alle x Sekunden
50         intervall_ardu += t2
51
52     # Red Pitaya
53     if time.time() >= intervall_pita:
54         count, data1 = pita.function(file_name_b, count, file) # Hole Daten vom
55         RedPitaya
56         intervall_pita += t3
57
58     # Pi Camera
59     # cam.camera()
60
61 ser.close()
62
63 # Plot erstellen für RedPitaya
64 #pita.plotfunction(count, zeitstempel, t, file_name_b, file, point)
```

## Unterprogramm für Arduino auslesen

```
1  # -*- coding: utf-8 -*-
2  """
3  Created on Mon Nov 16 09:28:01 2020
4
5  @author: kuhn_pr
6  Liest die Sensoren über den Arduino aus und speichert sie in ein Textfile
7  jedes File hat ein Zeitstempel
8  """
9  import serial
10 import time
11 import datetime
12
13 COM = 'Com3'
14 serial.Serial(COM, 19200).close()
15
16 def file(zeitstempel):
17     file_name = 'C:/Users/kuhn_pr/Documents/Messungen/' + zeitstempel + 'Arduino
18     auslesen.txt'
19     #erzeuge File
20     file = open(file_name, 'w')
21
22     file.write("Datum,Uhrzeit,Latitude,Longitude,Altitude,Satellites,Humidity,Pressure
23     ,Altitude2,Temp,P1.0,P2.5,P4.0,P10,P0.5,P1.0,P2.5,P4.0,P10,PartSize\n")
24     file.close()
25     return(file_name)
26
27 def ini():
28     ser = serial.Serial(COM, 19200) # Starte Serial Kommunikation
29     müll1 = ser.readline() # erste Line verwerfen
30     return ser
31
32 def function(old_data, ser):
33     if (ser.inWaiting() > 0): # Warte auf Line vom Arduino und
34         data = ser.readline()
35         lies sie
36         data = data.decode('utf-8')[:-2]
37         test = data.split(';')
38         if (len(test)==18):
39             return data
40         else:
41             return old_data
42     else:
43         return old_data
44
45 def writefunction(data, file_name_a):
46     file = open(file_name_a, 'a')
47     x = datetime.datetime.now()
48     file.write(str(x.strftime("%x; %X; ")))
49     file.write(data)
50     file.close()
```

## Unterprogramm für Red Pitaya auslesen

```
1  # -*- coding: utf-8 -*-
2  """
3  Created on Wed Dec 16 13:30:30 2020
4  @author: kuhn_pr ;
5  source: https://pyrpl.readthedocs.io/en/latest/user\_guide/tutorial/
6  https://redpitaya.readthedocs.io/en/latest/developerGuide/125-14/fastIO.html#
7
8  Liest die Eingänge IN1 und IN2 vom RedPitaya aus, plottet das Ergebnis und
9  speichert alle Werte in ein txt-File mit Zeitstempel
10 """
11 HOSTNAME = "192.168.1.100"
12
13 from pyrpl import RedPitaya
14 import time
15 import datetime
16 import matplotlib.pyplot as plt
17 import numpy as np
18
19 r = RedPitaya(hostname=HOSTNAME)
20 s = r.scope
21 factorIN1 = 29.02157869 # Berechnung Amplitude
22 factorIN2 = 29.0219
23 offsetIN1 = 0.0048
24 offsetIN2 = 0.0194
25
26 timeslabel, data1, data2 = [], [], [] # Variablen für RedPitaya
27
28 def file(zeitstempel):
29     file_name = 'C:/Users/kuhn_pr/Documents/Messungen/' + zeitstempel + 'Red
30     Pitaya.txt'
31     return(file_name)
32
33 def ini(file_name_b): #, header):
34     file = open(file_name_b, 'w')
35     #file.write(header)
36     file.write("\n Datum\t Uhrzeit \t Spannung IN1 IN2 [V]\n")
37     file = open(file_name_b, 'a')
38     return file
39
40 def function(timeslabel, count, file):
41     datas1 = (s.voltage_in1 + offsetIN1) * factorIN1
42     datas2 = (s.voltage_in2 + offsetIN2) * factorIN2
43     x = datetime.datetime.now()
44     file.write(str(x.strftime("%x; %X.%f; "))+ "%0.6f; %0.6f\n" % (datas1, datas2))
45     count += 1
46     return(count, datas1)
47
48 def plotfunction(count, zeitstempel, t, file_name_b, file, point):
49     s=-5
50     file.close()
51     file = open(file_name_b, 'r')
52     for line in file:
53         s += 1
54
55     file.close()
56     file = open(file_name_b, 'r')
57     header = file.readline()
58     header = file.readline()
59     header = file.readline()
60     header = file.readline()
61     header = file.readline()
62
63     z = 0
64
65     for i in range(s):
66         x = file.readline()
67         messdata = x.split("; ")
68         z += 1
69         if z >= point:
70             timeslabel.append(messdata[1])
71             data1.append(float(messdata[2]))
72             data2.append(float(messdata[3]))
```

```

72         z = 0
73
74     avr1 = np.mean([data1])
75     avr2 = np.mean([data2])
76     std1 = np.std([data1])
77     std2 = np.std([data2])
78     print('Average Amplitude IN1: ', avr1.round(3), 'V')
79     print('Average Amplitude IN2: ', avr2.round(3), 'V')
80     print('Standard Deviation IN1: ±', std1.round(4), 'V')
81     print('Standard Deviation IN2: ±', std2.round(4), 'V')
82
83     file = open(file_name_b, 'a')
84     file.write(('Mittelwert IN1 = ± ' '%.6f \t' % avr1))
85     file.write(('Mittelwert IN2 = ± ' '%.6f \n' % avr2))
86     file.write(('Standardabweichung IN1 = ± ' '%.6f \t' % std1))
87     file.write(('Standardabweichung IN2 = ± ' '%.6f \n' % std2))
88
89     # Plot erstellen
90     fig, (ax1, ax2) = plt.subplots(2, 1, figsize=(20, 30))
91     fig = plt.figure(num=1, figsize=(50, 20), dpi=70)
92     #fig.suptitle('Red Pitaya', fontsize = 22, fontweight='bold')
93     ax1.set_title('Signal IN1 - Standard Deviation: ± %.4f V' % std1, fontsize = 30)
94     ax1.set_xlabel('Time in [s]', fontsize = 30)
95     ax1.set_ylabel('Voltage in [V]', fontsize = 30)
96     ax1.plot(timeslabel, data1, linestyle='-', color='b', label='Signal IN1')
97     ax1.set_xticks(np.arange(0, len(timeslabel), s*0.01))
98     ax1.grid()
99     ax2.set_title('PMT Out - Standard Deviation: ± %.4f V' % std2, fontsize = 30)
100    ax2.set_xlabel('Time in [s]', fontsize = 30)
101    ax2.set_ylabel('Voltage in [V]', fontsize = 30)
102    ax2.plot(timeslabel, data2, linestyle='-', color='g', label='Signal IN2')
103    ax2.set_xticks(np.arange(0, len(timeslabel), s*0.01))
104    ax2.grid()
105    for label in ax1.get_xmajorticklabels() + ax2.get_xmajorticklabels():
106        label.set_rotation(90)
107        label.set_horizontalalignment("right")
108        label.set_fontsize(20)
109    for tick in ax1.xaxis.get_major_ticks() + ax2.xaxis.get_major_ticks() +
110        ax1.yaxis.get_major_ticks() + ax2.yaxis.get_major_ticks():
111        tick.label.set_fontsize(16)
112    # p1 = [0, avr1]
113    # p2 = [timeslabel[(count-1)], avr1]
114    # p3 = [0, avr2]
115    # p4 = [t, avr2]
116    # avr_graph1 = ax1.plot([p1[0], p2[0]], [p1[1], p2[1]], linestyle=':',
117        color='y', label=('Average IN1 = ' '%.2f V' % avr1))
118    # avr_graph2 = ax2.plot([p3[0], p4[0]], [p3[1], p4[1]], linestyle=':',
119        color='m', label=('Average IN2 = ' '%.2f V' % avr2))
120
121    ax1.legend(title = ('Messzeit = %.2f s' % t))
122    ax2.legend(title = ('Messzeit = %.2f s' % t))
123    file.write('Messzeit: %.1f s\t' % t)
124    file.write('Messpunkte: %i \n\n' % count)
125
126    #plt.savefig('C:/Users/kuhn_pr/Documents/Messungen/' + zeitstempel + 'Red
127    Pitaya.png')
128    file.close()
129    plt.show()
130    print(count, 'Messpunkte')
131    print('Messzeit: %.1f s' % t)

```

## Unterprogramm für PI-Kamera auslesen

```
1  #-*- coding: utf-8 -*-
2  """
3  Created on Thu Dec 10 09:28:01 2020
4
5  @author: kuhn_pr
6
7  Öffnet die Kamera und mit der Leertaste kann man Fotos aufnehmen, alle Fotos haben
8  einen
9  Zeitstempel. Zum Beenden die Esc-Taste drücken und das letzte Foto wird nochmals
10 angezeigt
11 """
12 import cv2
13 import os
14 import datetime
15
16 def camera():
17     cam = cv2.VideoCapture(0, cv2.CAP_DSHOW)
18     cv2.namedWindow("Raspi_Cam", cv2.WINDOW_AUTOSIZE)
19     path = r'C:\Users\kuhn_pr\Pictures\raspi_cam'
20     count = 0
21
22     while True:
23         ret, frame = cam.read()
24         if not ret:
25             print("failed to grab frame") # No Camera Signal
26             break
27
28         resized_frame = cv2.resize(frame, (1024, 720)) # Size Window
29         cv2.imshow("Raspi_Cam", resized_frame)
30
31         k = cv2.waitKey(1)
32
33         if k%256 == 27: # ESC pressed for
34             Close
35             print("Escape hit, closing...")
36             break
37         elif k%256 == 32: # SPACE pressed for
38             Take Photo
39             count += 1
40             img_name = 'Raspi_Cam'
41             extension = 'png'
42             img_name_format = '{:s} - {:s}.{:s}'
43             zeitstempel = datetime.datetime.now().strftime("%Y-%m-%d %H.%M.%S")
44             cv2.imwrite(os.path.join(path, img_name_format.format(zeitstempel,
45             img_name, extension)), frame)
46             print("{} written!".format(img_name_format.format(zeitstempel, img_name,
47             extension)))
48
49     cam.release() # Closes video file
50     cv2.destroyAllWindows()
51
52 # Show Picture Function
53 def Show_Picture():
54     path_read = r'C:\Users\kuhn_pr\Pictures\raspi
55     cam\{}'.format(img_name_format.format(zeitstempel, img_name, extension))
56     img_read = cv2.imread(path_read)
57     resized_image = cv2.resize(img_read, (512, 360))
58     cv2.imshow("Last Picture", resized_image)
59     cv2.waitKey(0)
60     cv2.destroyAllWindows()
61     return()
62
63 Show_Picture()
```

# Anhang

## A2 - Arduino Programm

```
1  #include <sps30.h>                                // für Sensorion SPS30
2  #include "UBLOX.h"                                // für ublox GPS
3  #include <SparkFunBME280.h>                       // für BME280
4
5  #define messzeit 1000                             // Zeit für Messintervall [ms]
6
7  // Variablen für Messwerte
8  float data_lat;                                   // Latitude
9  float data_lon;                                   // Longitude
10 float data_alt;                                   // Altitude
11 float data_sat;                                   // Satellites
12
13 float data_hum;                                    // Humidity
14 float data_pre;                                    // Pressure
15 float data_met;                                    // Altitude2
16 float data_tem;                                    // Temperature
17
18 float data_pm1;                                    // Staubteilchen
19 float data_pm2;
20 float data_pm3;
21 float data_pm4;
22 float data_pm5;
23 float data_pm6;
24 float data_pm7;
25 float data_pm8;
26 float data_pm9;
27 float data_pms;                                   // Durchschnitt Größe Staubteilchen
28
29 unsigned long pM = 0;
30
31 // BME280 über I²C
32 BME280 bme280;
33
34 // SPS30 über Serial2
35 // define communication channel to use for SPS30
36 #define SP30_COMMS SERIALPORT2
37 // function prototypes (sometimes the pre-processor does not create prototypes
38 // themself on ESPxx)
39 void serialTrigger(char * mess);
40 void ErrtoMess(char *mess, uint8_t r);
41 void Errorloop(char *mess, uint8_t r);
42 bool read_all();
43 // Create Constructor
44 SPS30 sps30;
45
46 // GPS Sensor über Serial3
47 UBLOX gps(Serial3, 19200);
48
49 bool ausgabe();
50
51 // begin setup
52 void setup() {
53     Serial.begin(19200);
54
55     // SPS30 Air Quality
56     // Begin communication channel
57     if (! sps30.begin(SP30_COMMS))
58         Errorloop((char *) "Could not initialize communication channel.", 0);
59     // check connection
60     if (! sps30.probe()) Errorloop((char *) "could not probe / connect with SPS30.", 0);
61     // reset SPS30 connection
62     if (! sps30.reset()) Errorloop((char *) "could not reset.", 0);
63     // start measurement
64     if (sps30.start());
65     else Errorloop((char *) "Could NOT start measurement\n", 0);
66
67     // BME280 Wetter Sensor
68     Wire.begin();
69     bme280.setI2CAddress(0x76);                    //Connect to Address 0x76
70
71     // GPS Sensor
72     gps.begin();
73 }
```

```

73
74 //////////////begin Loop//////////
75 void loop()
76 {
77     // GPS
78     if (gps.readSensor()) {
79         if (gps.getLatitude_deg() != 0) {
80             data_lat = gps.getLatitude_deg();
81         }
82         if (gps.getLongitude_deg() != 0) {
83             data_lon = gps.getLongitude_deg();
84         }
85         if (gps.getMSLHeight_m() != 0) {
86             data_alt = gps.getMSLHeight_m();
87         }
88         if (gps.getNumSatellites() != 0) {
89             data_sat = gps.getNumSatellites();
90         }
91     }
92
93     // BME280
94     float pressure;
95     if (bme280.beginI2C() == true) {
96         data_hum = bme280.readFloatHumidity();
97         data_pre = bme280.readFloatPressure();
98         data_met = bme280.readFloatAltitudeMeters();
99         data_tem = bme280.readTempC();
100     }
101
102     // SPS30
103     read_all();
104
105     //Ausgabe Daten
106     ausgabe();
107
108     delay(messzeit);
109 }
110
111 //////////////functions//////////
112 //Ausgabe
113 bool ausgabe() {
114     if (data_lat == 0) Serial.print("NaN");
115     else Serial.print(data_lat);
116     Serial.print(", ");
117     if (data_lon == 0) Serial.print("NaN");
118     else Serial.print(data_lon);
119     Serial.print(", ");
120     if (data_alt <= 15) Serial.print("NaN");
121     else Serial.print(data_alt, 2 );
122     Serial.print(", ");
123     if (data_sat == 0) Serial.print("NaN");
124     else Serial.print(data_sat, 0 );
125     Serial.print(", ");
126
127     if (data_hum == 0) Serial.print("NaN");
128     else Serial.print(data_hum, 1);
129     Serial.print(", ");
130     if (data_pre == 0) Serial.print("NaN");
131     else Serial.print((data_pre) / 100000, 5);
132     Serial.print(", ");
133     if (data_met == 0) Serial.print("NaN");
134     else Serial.print(data_met, 1);
135     Serial.print(", ");
136     Serial.print(data_tem, 2);
137     Serial.print(", ");
138
139     if (data_pm1 == 0) Serial.print("NaN");
140     else Serial.print(data_pm1, 2);
141     Serial.print(", ");
142     if (data_pm2 == 0) Serial.print("NaN");
143     else Serial.print(data_pm2, 2);
144     Serial.print(", ");
145     if (data_pm3 == 0) Serial.print("NaN");

```



```

146     else Serial.print(data_pm3, 2);
147     Serial.print("; ");
148     if (data_pm4 == 0) Serial.print("NaN");
149     else Serial.print(data_pm4, 2);
150     Serial.print("; ");
151     if (data_pm5 == 0) Serial.print("NaN");
152     else Serial.print(data_pm5, 2);
153     Serial.print("; ");
154     if (data_pm6 == 0) Serial.print("NaN");
155     else Serial.print(data_pm6, 2);
156     Serial.print("; ");
157     if (data_pm7 == 0) Serial.print("NaN");
158     else Serial.print(data_pm7, 2);
159     Serial.print("; ");
160     if (data_pm8 == 0) Serial.print("NaN");
161     else Serial.print(data_pm8, 2);
162     Serial.print("; ");
163     if (data_pm9 == 0) Serial.print("NaN");
164     else Serial.print(data_pm9, 2);
165     Serial.print("; ");
166     if (data_pms == 0) Serial.print("NaN");
167     else Serial.print(data_pms, 2);
168     Serial.print("\n");
169 }
170
171 // SPS30
172 //read and display all values
173 bool read_all()
174 {
175     static bool header = true;
176     uint8_t ret, error_cnt = 0;
177     struct sps_values val;
178
179     // loop to get data
180     do {
181         ret = sps30.GetValues(&val);
182
183         // data might not have been ready
184         if (ret == ERR_DATALENGTH) {
185             if (error_cnt++ > 3) {
186                 // ErrtoMess((char *) "\nError during reading values: ", ret);
187                 return (false);
188             }
189         }
190     }
191
192     while (ret != ERR_OK);
193     data_pm1 = val.MassPM1;
194     data_pm2 = val.MassPM2;
195     data_pm3 = val.MassPM4;
196     data_pm4 = val.MassPM10;
197     data_pm5 = val.NumPM0;
198     data_pm6 = val.NumPM1;
199     data_pm7 = val.NumPM2;
200     data_pm8 = val.NumPM4;
201     data_pm9 = val.NumPM10;
202     data_pms = val.PartSize;
203     return (true);
204 }
205
206 void Errorloop(char *mess, uint8_t r)
207 {
208     if (r) ErrtoMess(mess, r);
209     return (false);
210 }
211
212 void ErrtoMess(char *mess, uint8_t r)
213 {
214     char buf[80];
215     sps30.GetErrDescription(r, buf, 80);
216 }

```

## A3 - Kalibration

### Bestehendes System mit PMT

TROS Filter: Bandpass-, Langpass-Filter; Laser Filter: ND20A, NE30A							
Sensitivtity	Spannung [V]			Ampere [A]	AVR [V]	I/U	Leistung [W]
0	0,019	0,018	0,019	2,45E-08	0,018666667	1,31E-06	5,47E-07
1	0,047	0,048	0,048	2,45E-08	0,047666667	5,14E-07	2,14E-07
2	0,128	0,128	0,126	2,45E-08	0,127333333	1,92E-07	8,01E-08
3	0,405	0,411	0,406	2,45E-08	0,407333333	6,01E-08	2,50E-08
4	1,204	1,157	1,182	2,45E-08	1,181	2,07E-08	8,64E-09
5	3,918	3,976	3,91	2,45E-08	3,934666667	6,23E-09	2,59E-09
6	7,792	7,776	7,811	2,45E-08	7,793	3,14E-09	1,31E-09
TROS Filter: Bandpass-, Langpass-Filter; Laser Filter: ND20A							
Sensitivtity	Spannung [V]			Ampere [A]	AVR [V]	I/U	Leistung [W]
0	0,451	0,442	0,442	5,60E-07	0,445	1,26E-06	5,24E-07
1	1,445	1,418	1,44	5,60E-07	1,434333333	3,90E-07	1,63E-07
2	4,237	4,534	4,259	5,60E-07	4,343333333	1,29E-07	5,37E-08
3	11,094	11,183	10,942	5,60E-07	11,073	5,06E-08	2,11E-08
TROS Filter: Bandpass-, Langpass-Filter; Laser Filter: NE30A							
Sensitivtity	Spannung [V]			Ampere [A]	AVR [V]	I/U	Leistung [W]
0	0,119	0,116	0,115	1,27E-07	0,116666667	1,09E-06	4,53E-07
1	0,381	0,36	0,37	1,27E-07	0,370333333	3,43E-07	1,43E-07
2	1,077	1,106	1,089	1,27E-07	1,090666667	1,16E-07	4,85E-08
3	3,609	3,686	3,731	1,27E-07	3,675333333	3,46E-08	1,44E-08
4	7,994	8,05	8,101	1,27E-07	8,048333333	1,58E-08	6,57E-09
TROS Filter: Bandpass-, Langpass- und ND-Filter; Laser Filter: ND20A, NE30A							
Sensitivtity	Spannung [V]			Ampere [A]	AVR [V]	I/U	Leistung [W]
0	0,01	0,012	0,012	2,67E-08	0,011333333	2,35E-06	9,79E-07
1	0,015	0,016	0,018	2,67E-08	0,016333333	1,63E-06	6,79E-07
2	0,036	0,035	0,035	2,67E-08	0,035333333	7,54E-07	3,14E-07
3	0,097	0,105	0,098	2,67E-08	0,1	2,67E-07	1,11E-07
4	0,298	0,313	0,311	2,67E-08	0,307333333	8,67E-08	3,61E-08
5	0,642	0,629	0,609	2,67E-08	0,626666667	4,25E-08	1,77E-08
6	1,79	1,776	1,623	2,67E-08	1,729666667	1,54E-08	6,42E-09
7	5,388	5,725	5,715	2,67E-08	5,609333333	4,75E-09	1,98E-09
TROS Filter: Bandpass-, Langpass- und ND-Filter; Laser Filter: ND20A							
Sensitivtity	Spannung [V]			Ampere [A]	AVR [V]	I/U	Leistung [W]
0	0,065	0,065	0,068	5,60E-07	0,066	8,48E-06	3,53E-06
1	0,202	0,203	0,193	5,60E-07	0,199333333	2,81E-06	1,17E-06
2	0,599	0,593	0,587	5,60E-07	0,593	9,44E-07	3,93E-07
3	1,957	1,935	1,934	5,60E-07	1,942	2,88E-07	1,20E-07
4	5,575	5,487	5,617	5,60E-07	5,559666667	1,01E-07	4,19E-08
5	11,117			5,60E-07			
TROS Filter: Bandpass-, Langpass- und ND-Filter; Laser Filter: NE30A							
Sensitivtity	Spannung [V]			Ampere [A]	AVR [V]	I/U	Leistung [W]
0	0,025	0,023	0,025	1,39E-07	0,024333333	5,71E-06	2,38E-06
1	0,06	0,062	0,064	1,39E-07	0,062	2,24E-06	9,34E-07
2	0,169	0,174	0,173	1,39E-07	0,172	8,08E-07	3,37E-07
3	0,589	0,616	0,61	1,39E-07	0,605	2,30E-07	9,57E-08
4	1,751	1,688	1,58	1,39E-07	1,673	8,31E-08	3,46E-08
5	3,898	3,852	3,874	1,39E-07	3,874666667	3,59E-08	1,49E-08
6	8,167	8,279	8,16	1,39E-07	8,202	1,69E-08	7,06E-09

# Neues System mit PMT

TROS Filter: Bandpass-, Langpass-Filter; Laser Filter: ND20A, NE30A							
Sensitivity	Spannung [V]			Ampere [A]	AVR [V]	I/U	[P/U] Leistung [W]
0	0,019	0,019	0,02	4,29E-08	0,019333333	2,22E-06	9,24E-07 1,79E-08
1	0,042	0,042	0,043	4,29E-08	0,042333333	1,01E-06	4,22E-07 1,79E-08
2	0,104	0,104	0,103	4,29E-08	0,103666667	4,14E-07	1,72E-07 1,79E-08
3	0,33	0,328	0,324	4,29E-08	0,327333333	1,31E-07	5,46E-08 1,79E-08
4	0,949	0,941	0,951	4,29E-08	0,947	4,53E-08	1,89E-08 1,79E-08
5	3,12	3,137	3,13	4,29E-08	3,129	1,37E-08	5,71E-09 1,79E-08
6	7,693	7,859	7,596	4,29E-08	7,716	5,56E-09	2,32E-09 1,79E-08

TROS Filter: Bandpass-, Langpass-Filter; Laser Filter: NE30A							
Sensitivity	Spannung [V]			Ampere [A]	AVR [V]	I/U	[P/U] Leistung [W]
0	0,052	0,051	0,051	1,32E-07	0,051333333	2,56E-06	1,07E-06 5,48E-08
1	0,138	0,138	0,139	1,32E-07	0,138333333	9,51E-07	3,96E-07 5,48E-08
2	0,395	0,391	0,382	1,32E-07	0,389333333	3,38E-07	1,41E-07 5,48E-08
3	1,262	1,264	1,25	1,32E-07	1,258666667	1,05E-07	4,35E-08 5,48E-08
4	3,706	3,815	3,644	1,32E-07	3,721666667	3,54E-08	1,47E-08 5,48E-08

TROS Filter: Bandpass-, Langpass-Filter; Laser Filter: ND20A							
Sensitivity	Spannung [V]			Ampere [A]	AVR [V]	I/U	[P/U] Leistung [W]
0	0,146	0,149	0,151	5,02E-07	0,148666667	3,38E-06	1,41E-06 2,09E-07
1	0,496	0,468	0,466	5,02E-07	0,476666667	1,05E-06	4,39E-07 2,09E-07
2	1,373	1,405	1,427	5,02E-07	1,401666667	3,58E-07	1,49E-07 2,09E-07
3	4,583	5,537	6,062	5,02E-07	5,394	9,31E-08	3,88E-08 2,09E-07
4	11,368	11,368	11,368	5,02E-07	11,368	4,42E-08	1,84E-08 2,09E-07

**Neues System mit PDA**

TROS Filter: Bandpass-, Langpass-Filter; Laser Filter: ND20A, NE30A								
Gain	Spannung [V]			Ampere [A]	AVR [V]	I/U	[P/U]	Leistung [W]
10	0,01	0,009	0,009	2,94E-08	0,009333333	3,15E-06	1,31E-06	1,22E-08
20	0,013	0,016	0,015	2,94E-08	0,014666667	2,00E-06	8,34E-07	1,22E-08
30	0,039	0,034	0,039	2,94E-08	0,037333333	7,86E-07	3,27E-07	1,22E-08
40	0,107	0,103	0,106	2,94E-08	0,105333333	2,79E-07	1,16E-07	1,22E-08
50	0,356	0,324	0,312	2,94E-08	0,330666667	8,88E-08	3,70E-08	1,22E-08
60	1,163	0,998	1,18	2,94E-08	1,113666667	2,64E-08	1,10E-08	1,22E-08
70	3,246	3,417	3,678	2,94E-08	3,447	8,52E-09	3,55E-09	1,22E-08

TROS Filter: Bandpass-, Langpass-Filter; Laser Filter: NE30A								
Gain	Spannung [V]			Ampere [A]	AVR [V]	I/U	[P/U]	Leistung [W]
10	0,01	0,009	0,011	1,38E-07	0,01	1,38E-05	5,75E-06	5,75E-08
20	0,017	0,019	0,018	1,38E-07	0,018	7,67E-06	3,19E-06	5,75E-08
30	0,044	0,043	0,042	1,38E-07	0,043	3,21E-06	1,34E-06	5,75E-08
40	0,129	0,126	0,134	1,38E-07	0,129666667	1,06E-06	4,43E-07	5,75E-08
50	0,401	0,385	0,383	1,38E-07	0,389666667	3,54E-07	1,47E-07	5,75E-08
60	1,233	1,31	1,272	1,38E-07	1,271666667	1,09E-07	4,52E-08	5,75E-08
70	3,632	4,248	4,071	1,38E-07	3,983666667	3,46E-08	1,44E-08	5,75E-08

TROS Filter: Bandpass-, Langpass-Filter; Laser Filter: ND20A								
Gain	Spannung [V]			Ampere [A]	AVR [V]	I/U	[P/U]	Leistung [W]
10	0,013	0,013	0,013	4,50E-07	0,013	3,46E-05	1,44E-05	1,87E-07
20	0,032	0,032	0,031	4,50E-07	0,031666667	1,42E-05	5,92E-06	1,87E-07
30	0,091	0,092	0,09	4,50E-07	0,091	4,95E-06	2,06E-06	1,87E-07
40	0,266	0,275	0,275	4,50E-07	0,272	1,65E-06	6,89E-07	1,87E-07
50	0,849	0,846	0,844	4,50E-07	0,846333333	5,32E-07	2,21E-07	1,87E-07
60	2,634	2,741	2,763	4,50E-07	2,712666667	1,66E-07	6,91E-08	1,87E-07
70	7,526	7,601	7,684	4,50E-07	7,603666667	5,92E-08	2,46E-08	1,87E-07

Dunkelmessung vorhandenes System mit PMT								
Sensitivity	Spannung [V]			Ampere [A]	AVR [V]	I/U	[P/U]	Leistung [W]
0	0,037	0,039	0,038	3,95E-11	0,038	1,04E-09	4,33E-10	1,64E-11
1	0,037	0,037	0,037	3,95E-11	0,037	1,07E-09	4,45E-10	1,64E-11
2	0,037	0,037	0,037	3,95E-11	0,037	1,07E-09	4,45E-10	1,64E-11
3	0,037	0,037	0,038	3,95E-11	0,037333333	1,06E-09	4,41E-10	1,64E-11
4	0,039	0,037	0,037	3,95E-11	0,037666667	1,05E-09	4,37E-10	1,64E-11
5	0,038	0,04	0,04	3,95E-11	0,039333333	1,00E-09	4,18E-10	1,64E-11
6	0,076	0,075	0,074	3,95E-11	0,075	5,27E-10	2,19E-10	1,64E-11
7	0,22	0,206	0,221	3,95E-11	0,215666667	1,83E-10	7,63E-11	1,64E-11

Dunkelmessung neues System mit PMT								
Sensitivity	Spannung [V]			Ampere [A]	AVR [V]	I/U	[P/U]	Leistung [W]
0	0,032	0,032	0,033	2,80E-11	0,032333333	8,66E-10	3,61E-10	1,17E-11
1	0,034	0,033	0,033	2,80E-11	0,033333333	8,40E-10	3,50E-10	1,17E-11
2	0,035	0,033	0,034	2,80E-11	0,034	8,24E-10	3,43E-10	1,17E-11
3	0,033	0,035	0,034	2,80E-11	0,034	8,24E-10	3,43E-10	1,17E-11
4	0,034	0,033	0,035	2,80E-11	0,034	8,24E-10	3,43E-10	1,17E-11
5	0,039	0,038	0,039	2,80E-11	0,038666667	7,24E-10	3,02E-10	1,17E-11
6	0,082	0,081	0,081	2,80E-11	0,081333333	3,44E-10	1,43E-10	1,17E-11
7	0,248	0,249	0,247	2,80E-11	0,248	1,13E-10	4,70E-11	1,17E-11

Dunkelmessung Photodiode Sensitivity 5								
Gain [dB]	Spannung [V]			Ampere [A]	AVR [V]	I/U	[P/U]	Leistung [W]
0	0,037	0,037	0,037	1,75E-11	0,037	4,73E-10	1,97E-10	7,29E-12
10	0,044	0,041	0,045	1,75E-11	0,043333333	4,04E-10	1,68E-10	7,29E-12
20	0,041	0,041	0,041	1,75E-11	0,041	4,27E-10	1,78E-10	7,29E-12
30	0,063	0,066	0,065	1,75E-11	0,064666667	2,71E-10	1,13E-10	7,29E-12
40	0,187	0,181	0,185	1,75E-11	0,184333333	9,49E-11	3,95E-11	7,29E-12
50	0,536	0,543	0,552	1,75E-11	0,543666667	3,22E-11	1,34E-11	7,29E-12
60	1,64	1,749	1,747	1,75E-11	1,712	1,02E-11	4,26E-12	7,29E-12
70	5,035	5,139	5,283	1,75E-11	5,152333333	3,40E-12	1,41E-12	7,29E-12

# A4 - Messergebnisse

## Streulichtaufbau

### Streulichtaufbau und Optopolymer-Streuplatte

Vorhandenes System mit PMT bei Sensitivity 4						
Streuwinkel 40°						
Winkel [°]	Spannung [V]			AVR [V]	Leistung [W]	BRDF [1/sr]
0	0,665	0,659	0,669	0,664	5,73616E-09	0,06411552
5	0,714	0,709	0,712	0,711	6,14218E-09	0,06891606
10	0,706	0,709	0,702	0,708	6,11627E-09	0,06941876
15	0,715	0,719	0,712	0,716	6,18538E-09	0,07157549
20	0,675	0,681	0,681	0,68	5,87438E-09	0,06987441
25	0,652	0,649	0,656	0,651	5,62385E-09	0,06935861
30	0,670	0,680	0,669	0,675	5,83119E-09	0,07526069
35	0,640	0,645	0,639	0,642	5,54611E-09	0,07567729
40	0,630	0,631	0,621	0,627	5,41652E-09	0,07903303
45	0,569	0,568	0,571	0,57	4,92411E-09	0,07783679
50	0,548	0,547	0,555	0,551	4,75998E-09	0,08277119
55	0,536	0,537	0,532	0,535	4,62175E-09	0,09006531
60	0,456	0,457	0,453	0,457	3,94793E-09	0,0882554
65	0,435	0,442	0,435	0,439	3,79243E-09	0,1003024
70	0,350	0,348	0,349	0,351	3,03222E-09	0,09909472
75	0,283	0,286	0,286	0,284	2,45342E-09	0,10595396
80	0,222	0,221	0,222	0,222	1,91781E-09	0,12344623

neues System mit PMT bei Sensitivity 5						
Streuwinkel 40°						
Winkel [°]	Spannung [V]			AVR [V]	Leistung [W]	BRDF [1/sr]
0	2,639	2,653	2,63	2,64066667	1,50766E-08	0,16851719
5	2,851	2,998	2,951	2,93333333	1,67475E-08	0,1879091
10	3,186	3,164	3,131	3,16033333	1,80435E-08	0,20479156
15	3,253	3,192	3,235	3,22666667	1,84223E-08	0,21317729
20	3,369	3,358	3,321	3,34933333	1,91226E-08	0,22745903
25	3,345	3,363	3,364	3,35733333	1,91683E-08	0,23640103
30	3,375	3,359	3,353	3,36233333	1,91968E-08	0,24776545
35	3,431	3,45	3,428	3,43633333	1,96193E-08	0,26770802
40	3,395	3,316	3,292	3,33433333	1,9037E-08	0,27777021
45	3,139	3,186	3,22	3,18166667	1,81653E-08	0,28714436
50	3,044	3,103	3,115	3,08733333	1,76267E-08	0,30651141
55	2,891	2,855	2,857	2,86766667	1,63726E-08	0,31905679
60	2,625	2,587	2,686	2,63266667	1,50309E-08	0,33601332
65	2,291	2,268	2,25	2,26966667	1,29584E-08	0,34272394
70	1,845	1,88	1,892	1,87233333	1,06899E-08	0,34935109
75	1,42	1,411	1,424	1,41833333	8,0978E-09	0,34971374
80	1,065	1,051	1,063	1,05966667	6,05004E-09	0,38943023

neues System mit PDA bei Sensitivity 5, Gain 60dB						
Streuwinkel 40°						
Winkel [°]	Spannung [V]			AVR [V]	Leistung [W]	BRDF [1/sr]
0	3,309	3,22	3,27	3,26633333	3,59E-08	0,40081155
5	3,576	3,251	3,429	3,41866667	3,75E-08	0,4211068
10	3,381	3,318	3,354	3,351	3,68E-08	0,41754443
15	3,102	3,159	3,127	3,12933333	3,44E-08	0,39754635
20	3,286	3,167	3,218	3,22366667	3,54E-08	0,4209631
25	2,996	3,148	3,084	3,076	3,38E-08	0,41647635
30	2,87	2,995	2,918	2,92766667	3,21E-08	0,41483054
35	3,182	3,04	2,992	3,07133333	3,37E-08	0,46008932
40	3,266	3,464	3,357	3,36233333	3,69E-08	0,53860021
45	3,234	3,261	3,231	3,242	3,56E-08	0,56261037
50	3,484	3,239	3,329	3,35066667	3,68E-08	0,63965154
55	3,339	3,288	3,309	3,312	3,64E-08	0,70856345
60	2,948	3,019	2,976	2,981	3,27E-08	0,73159662
65	2,92	2,956	2,936	2,93733333	3,22E-08	0,85287365
70	2,682	2,948	2,769	2,79966667	3,07E-08	1,00446397
75	2,911	3,03	2,731	2,89066667	3,17E-08	1,37050778
80	3,213	3,027	3,118	3,11933333	3,42E-08	2,20430292

**Streulichtaufbau Abstandsmessung mit Aluminium-Streuplatte**

Abstand [cm]	Spannung [V]			AVR [V]	Leistung [W]
5	2,611	2,689	2,638	2,646	1,44E-07
10	1,167	1,126	1,139	1,144	6,25E-08
15	0,588	0,601	0,592	0,59366667	3,24E-08
20	0,347	0,351	0,349	0,349	1,91E-08
25	0,258	0,263	0,26	0,26033333	1,42E-08
30	0,197	0,207	0,186	0,19666667	1,07E-08

**Streulichtaufbau mit neuen System mit PMT und Aluminium-Streuplatte**

Streuwinkel 30°						
Winkel [°]	Spannung [V]			AVR [V]	Leistung [W]	BRDF [1/sr]
0	0,023	0,024	0,024	0,02366667	2,18688E-08	0,09840961
5	0,03	0,03	0,031	0,03033333	2,8029E-08	0,12661242
10	0,038	0,038	0,038	0,038	3,51133E-08	0,16044735
15	0,053	0,052	0,053	0,05266667	4,86657E-08	0,22672137
20	0,085	0,085	0,085	0,085	7,85428E-08	0,37612614
25	0,252	0,246	0,243	0,247	2,28236E-07	1,13323937
26	0,324	0,325	0,327	0,32533333	3,00619E-07	1,5051119
27	0,445	0,445	0,442	0,444	4,10271E-07	2,07206082
28	0,693	0,676	0,682	0,68366667	6,31731E-07	3,2196591
29	0,956	0,954	0,951	0,95366667	8,81219E-07	4,53396076
30	2,863	2,776	2,761	2,8	2,58729E-06	13,4439786
31	5,329	5,436	5,409	5,39133333	4,98177E-06	26,1535713
32	2,818	2,858	2,867	2,84766667	2,63134E-06	13,9626895
33	0,842	0,862	0,875	0,85966667	7,9436E-07	4,26225175
34	0,535	0,536	0,529	0,53333333	4,92818E-07	2,67500703
35	0,391	0,387	0,387	0,38833333	3,58833E-07	1,97124481
36	0,321	0,309	0,307	0,31233333	2,88606E-07	1,60531811
37	0,26	0,263	0,259	0,26066667	2,40865E-07	1,35717951
40	0,127	0,125	0,124	0,12533333	1,15812E-07	0,68031968
45	0,062	0,062	0,063	0,06233333	5,75981E-08	0,36655214
50	0,04	0,041	0,04	0,04033333	3,72693E-08	0,26091379
55	0,033	0,032	0,033	0,03266667	3,01851E-08	0,23681758
60	0,026	0,025	0,025	0,02533333	2,34088E-08	0,21067973
65	0,022	0,021	0,022	0,02166667	2,00207E-08	0,21317892
70	0,017	0,017	0,019	0,01766667	1,63246E-08	0,2147847
75	0,015	0,014	0,015	0,01466667	1,35525E-08	0,23563272
80	0,013	0,014	0,014	0,01366667	1,26285E-08	0,32725989
85	0,011	0,011	0,01	0,01066667	9,85635E-09	0,50890079
90	0,012	0,01	0,011	0,011	1,01644E-08	7,4668E+14

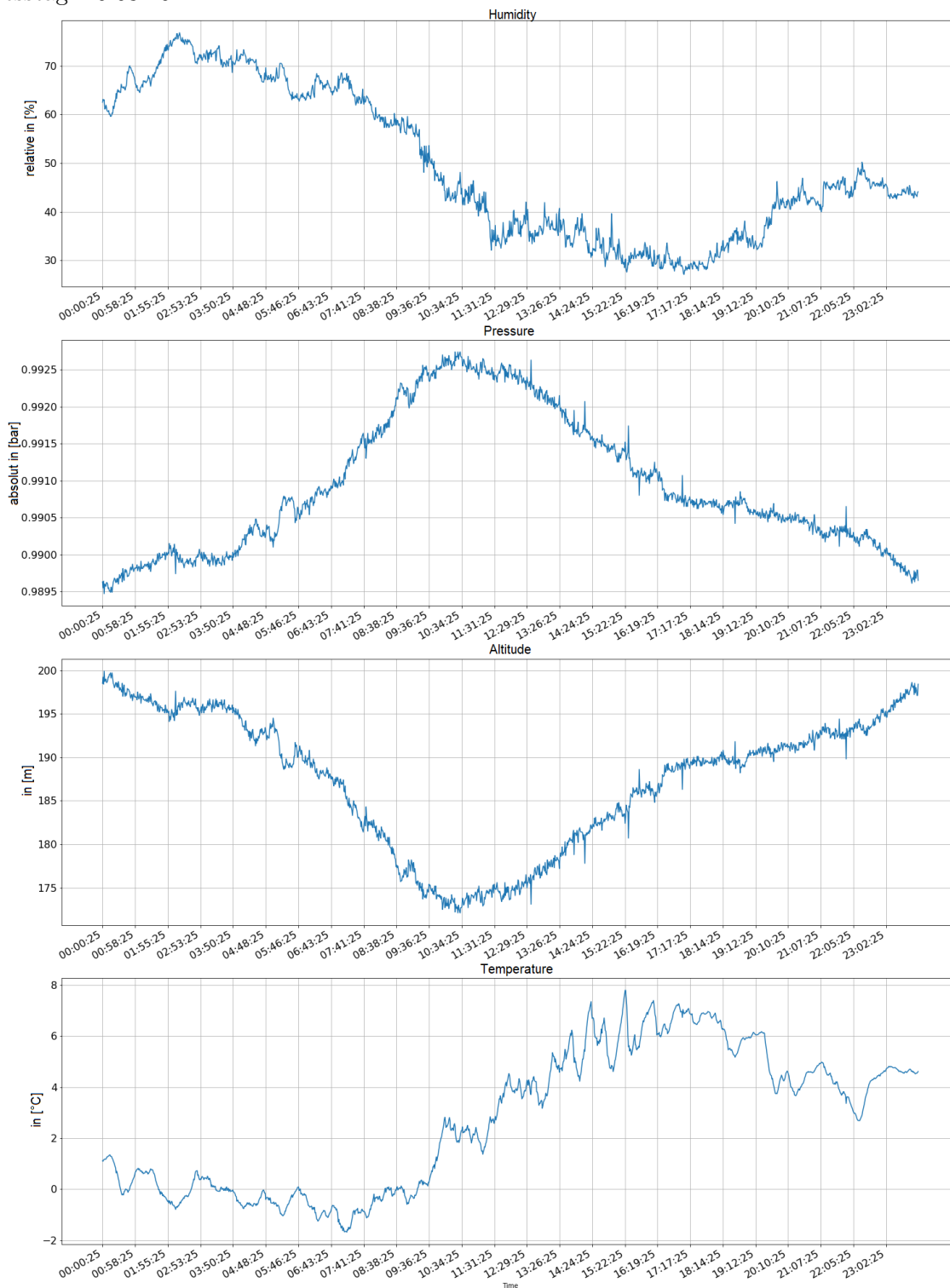


**Streulichtaufbau mit neuen System mit PMT und Aluminium-Streuplatte**

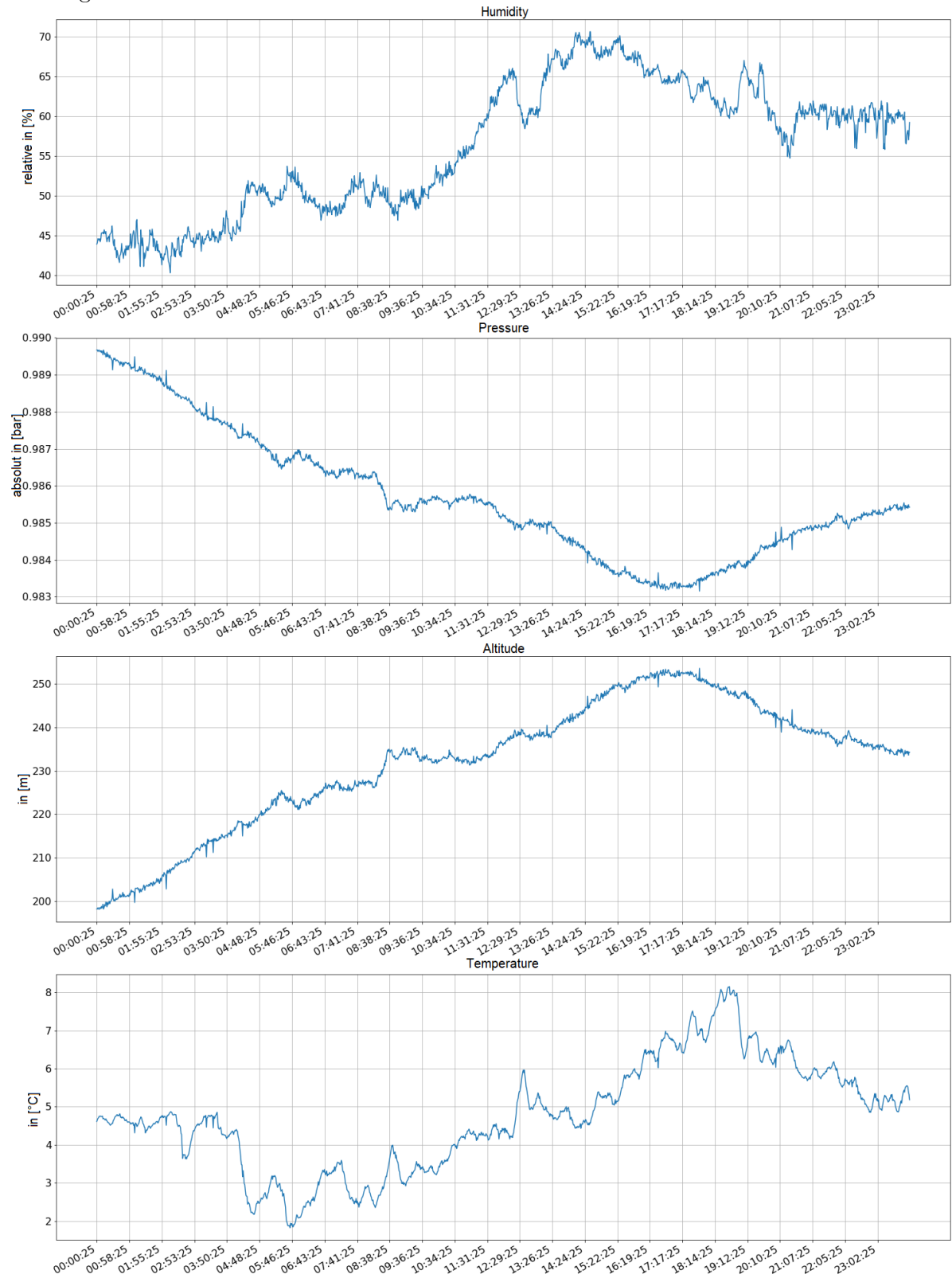
Streuwinkel 40°						
Winkel [°]	Spannung [V]			AVR [V]	Leistung [W]	BRDF [1/sr]
0	0,013	0,013	0,013	0,013	1,20124E-08	0,05405598
5	0,014	0,014	0,014	0,014	1,29365E-08	0,0584365
10	0,015	0,015	0,015	0,015	1,38605E-08	0,06333448
15	0,015	0,015	0,015	0,015	1,38605E-08	0,06457254
20	0,018	0,019	0,019	0,01866667	1,72486E-08	0,08260025
25	0,03	0,03	0,03	0,03	2,7721E-08	0,13764041
30	0,051	0,051	0,05	0,05066667	4,68177E-08	0,24327199
35	0,108	0,018	0,108	0,078	7,20746E-08	0,39594102
36	0,136	0,134	0,133	0,13433333	1,24128E-07	0,69044098
37	0,156	0,158	0,157	0,157	1,45073E-07	0,81743165
38	0,183	0,183	0,182	0,18266667	1,6879E-07	0,96389022
39	0,234	0,231	0,232	0,23233333	2,14684E-07	1,24310937
40	0,385	0,377	0,378	0,38	3,51133E-07	2,06267138
41	0,607	0,6	0,603	0,60333333	5,575E-07	3,324129
42	2,386	2,392	2,38	2,386	2,20474E-06	13,3504958
43	4,873	4,885	4,848	4,86866667	4,49881E-06	27,6810774
44	1,509	1,488	1,492	1,49633333	1,38266E-06	8,6495731
45	0,596	0,605	0,601	0,60066667	5,55036E-07	3,53222974
46	0,368	0,376	0,376	0,37333333	3,44972E-07	2,23473436
47	0,293	0,289	0,291	0,291	2,68894E-07	1,77423062
48	0,182	0,183	0,183	0,18266667	1,6879E-07	1,13513841
49	0,144	0,142	0,141	0,14233333	1,31521E-07	0,90211959
50	0,135	0,138	0,138	0,137	1,26593E-07	0,88624436
55	0,065	0,065	0,065	0,065	6,00621E-08	0,47121865
60	0,039	0,039	0,039	0,039	3,60373E-08	0,32433589
65	0,028	0,03	0,03	0,02933333	2,7105E-08	0,28861146
70	0,023	0,025	0,025	0,02433333	2,24848E-08	0,29583553
75	0,02	0,021	0,02	0,02033333	1,87887E-08	0,32667264
80	0,015	0,016	0,015	0,01533333	1,41685E-08	0,36716964

# Beispiele für Wetterdaten vom Bosch BME280

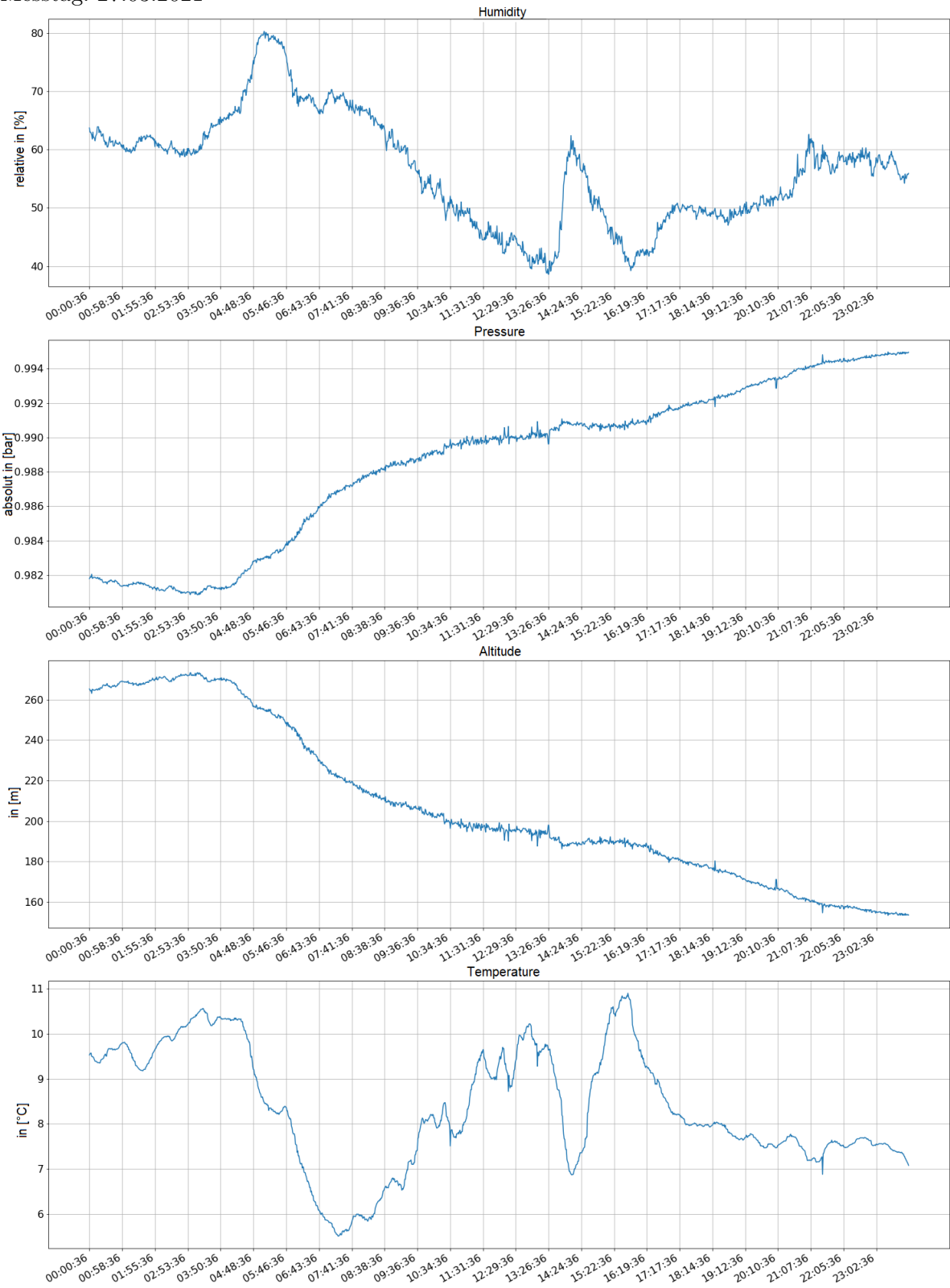
Messtag: 20.03.2021



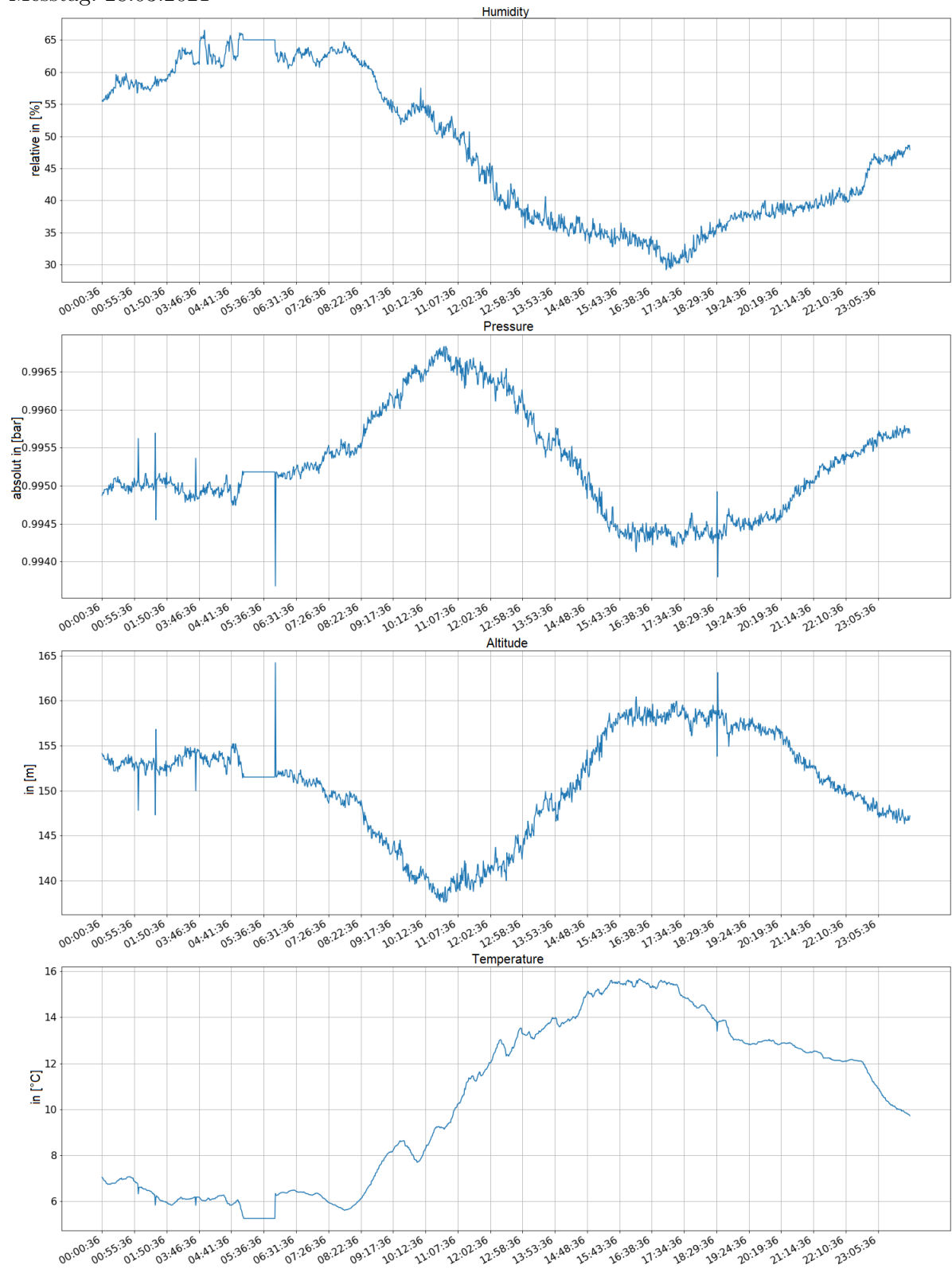
Messtag: 21.03.2021



Messtag: 27.03.2021



Messtag: 28.03.2021

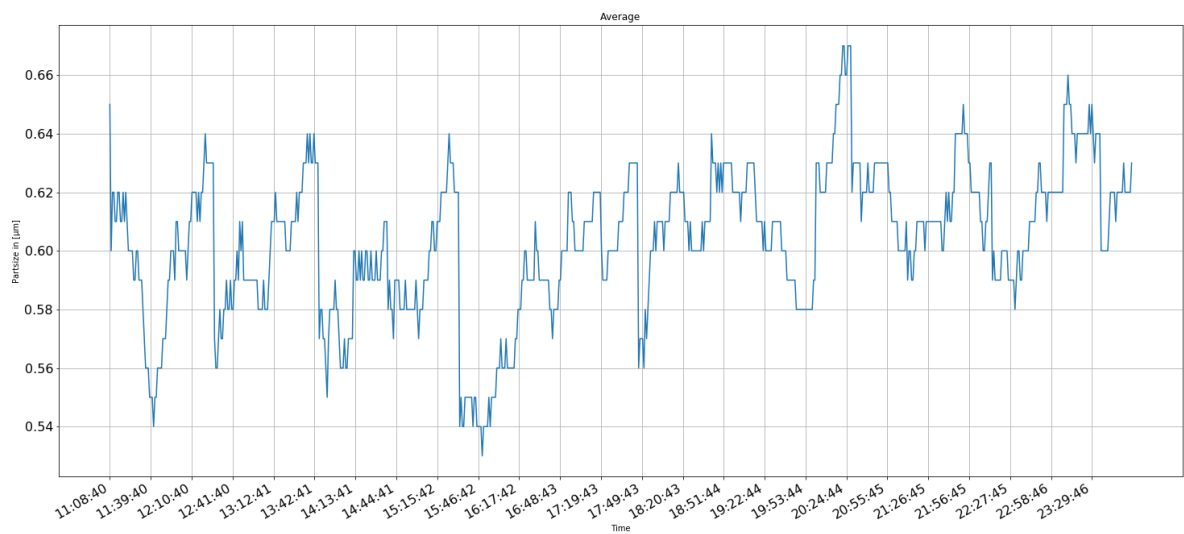
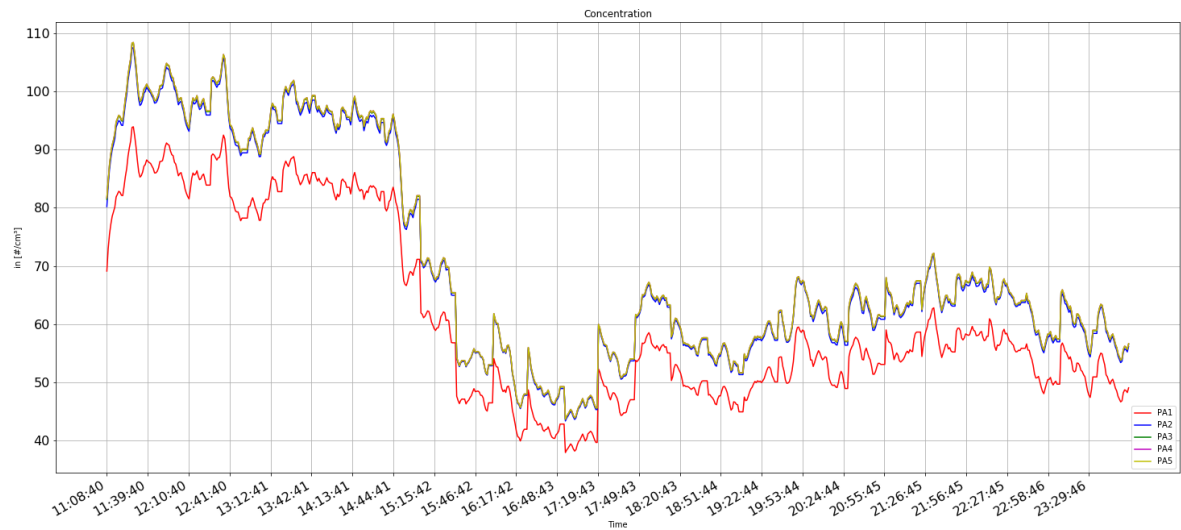
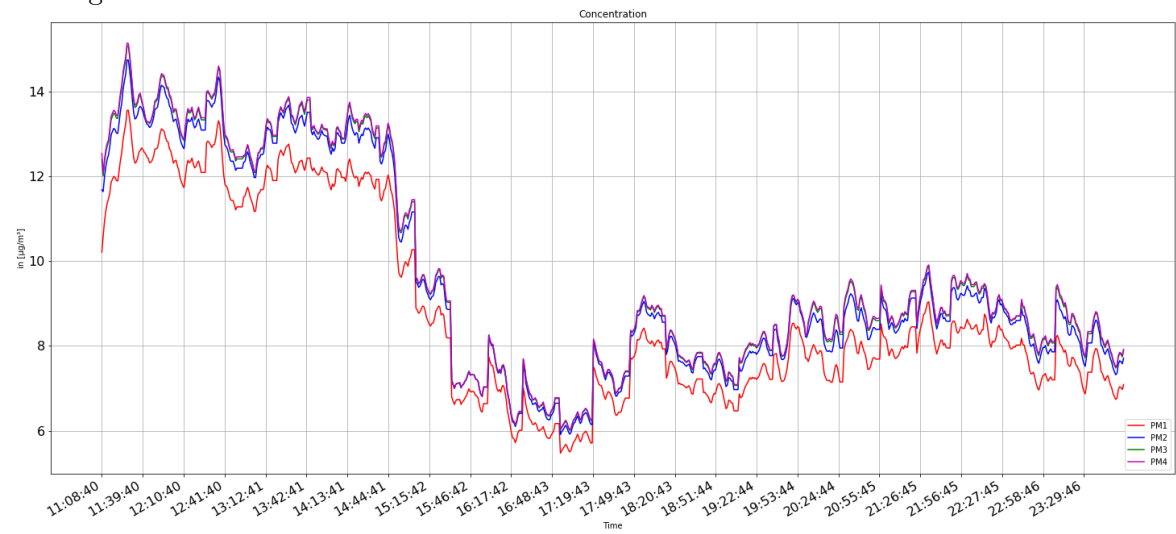


# Beispiele für Wetterdaten vom Sensirion SPS30

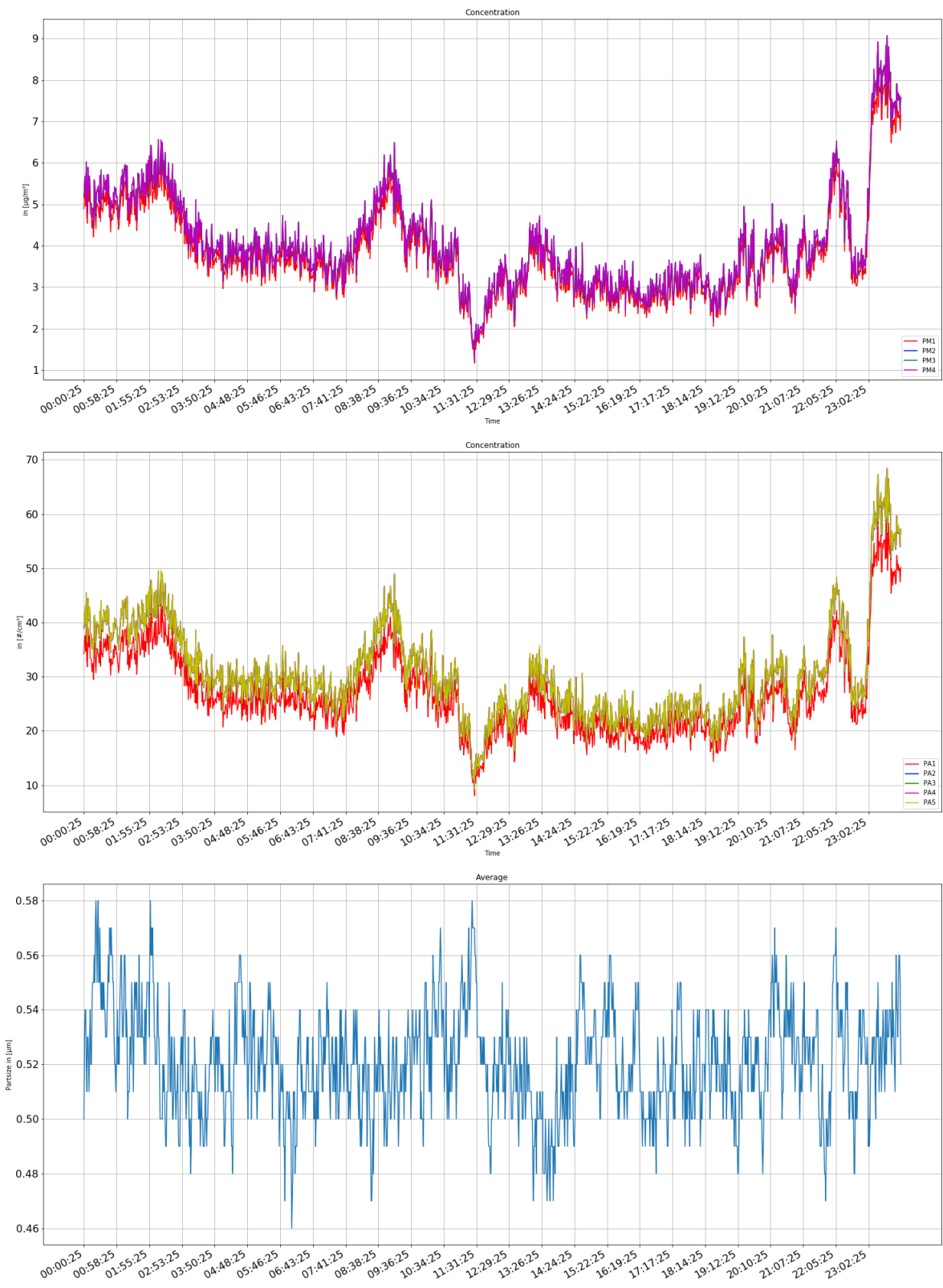
Messtag: 24.01.2021



Messtag: 01.03.2021



Messtag: 20.03.2021





Messtag: 21.03.2021

